



**Ana Filipa Lota Alfeirão Gonçalves Pinheiro**

Licenciada em Ciências de Engenharia do Ambiente

## **Análise de chips de pneus usados para aplicações em sistemas de drenagem de cobertura final de aterros sanitários**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Perfil gestão e sistemas ambientais

Orientadora: Ana Isabel Espinha da Silveira, Professora auxiliar DCEA, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Maria da Graça Madeira Martinho

Arguente(s): Prof. Doutor Artur João Lopes Cabeças



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Julho 2011

## **Análise de chips de pneus para aplicações em sistemas de drenagem de cobertura final de aterros sanitários**

Copyright © Ana Filipa Lota Alfeirão Gonçalves Pinheiro

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de outra forma digital, ou por qualquer meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua própria cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*“A ti avô, que fizeste da tua pessoa um exemplo a seguir, e que continuas a dar-me força  
para continuar nesta luta diária que é a vida”*

*“Não é forte aquele que nunca cai, mas aquele que quando cai encontra forças para se  
levantar”*

Autor Desconhecido



## AGRADECIMENTOS

---

Uma dissertação, apesar do processo solitário que ocupa a maior parte do tempo, reúne o contributo de várias pessoas, não só as que permitiram o seu desenvolvimento e conclusão, assim como as que o forneceram o tão importante apoio, e que me fizeram chegar a esta fase.

Assim, em primeiro lugar agradeço à Professora Doutora Ana Silveira, minha orientadora, por toda a ajuda e orientação. Um profundo obrigado pela sua preocupação e disponibilidade.

Agradeço à empresa Amarsul, nomeadamente ao Engenheiro Artur João Cabeças pela disponibilidade e apoio técnico fornecido, assim como ao Engenheiro Nuno Lobato pela disponibilidade e apoio que me foi proporcionado nas visitas ao Aterro Sanitário em Palmela. Aproveito também para agradecer a toda a equipa de segurança do aterro, que sempre me mostrou amabilidade nas várias recolhas levadas a cabo nas instalações.

Reconheço também o apoio fornecido pela empresa Recipneu, nomeadamente do Engenheiro Vasco Pampulim, por me ter recebido nas suas instalações com simpatia, tendo prestado diversos esclarecimentos, e também por ter cedido gentilmente as amostras que permitiram o desenvolvimento deste projecto.

Na FCT-UNL, não posso deixar de agradecer o apoio que me foi fornecido pelas colaboradoras dos laboratórios, nomeadamente a D. Adélia e a D. Luísa. Um agradecimento especial à Engenheira Maria José Correia, pelo apoio prestado, pelas inúmeras vezes em que salvaguardou os ensaios realizados em laboratório, e por todas as suas sugestões fornecidas, ao longo do projecto, ajudando muitas vezes a contrariar os imprevistos que surgiram.

À Técnica de Laboratório Carla Rodrigues, pelas análises realizadas aos lixiviados, e por muitas vezes executá-las numa luta contra o tempo, muito obrigada.

Agradeço ainda à professora doutora Maria João Melo, assim como às alunas Ana Pereira e Joana Ferreira do departamento de Conservação e Restauro, pelo apoio prestado, numa componente prática, que infelizmente não pôde ser concretizada.

Finalmente, agradeço às professoras doutoras Graça Martinho e Lia Vasconcelos pela amabilidade e disponibilidade, em me fornecerem um local tranquilo para completar a componente escrita deste trabalho. Às colegas Ana Gomes e Conceição Brito, agradeço todos os esclarecimentos e material que me forneceram e que permitiram a conclusão deste projecto.

De uma forma indirecta, muitas foram as pessoas que me permitiram chegar a esta fase final do curso, depois de muitas horas conjuntas de esforço. Agradeço as horas de companheirismo que tive com vários colegas e amigos de curso em especial à Ana Maria, Tânia, Catarina e João. Nesta última fase agradeço especialmente ao colega de laboratório e recente amigo Paulo Fernandes, pelas palavras de incentivo.

Por último, agradeço à minha mãe e irmão, pelo apoio que me prestaram, e por me terem dado sempre condições para chegar até aqui. Um obrigado especial ao André, pela inesgotável paciência que teve para comigo, ao longo deste ano de trabalho.

Com a proibição da deposição de pneus usados em aterros sanitários devido aos diversos inconvenientes associados a esta prática, a comunidade em geral foi obrigada a encontrar novos destinos para este tipo de material. No decorrer da gestão de pneus usados, o fim que se pode dar a estes passa por processos como a reutilização, recauchutagem, reciclagem e valorização energética. Do processamento mecânico de pneus usados, resultam os chamados chips de pneus. Estes consistem em pequenos fragmentos de pneus, que possuem diversas aplicações em engenharia civil e geotécnica. Uma das suas aplicações consiste na sua utilização como material drenante em sistemas de drenagem de aterros sanitários, substituindo material mineral como brita calcária, seixo ou cascalho. Para além das vantagens ambientais associadas a esta substituição, devido à valorização de um resíduo e preservação de recursos naturais, a utilização deste tipo de material possui outras vantagens físicas e económicas.

Recentemente, foi também levantada na comunidade científica a questão do potencial risco dos pneus usados libertarem alguns compostos, presentes na sua composição ou utilizados no seu processo de fabrico, principalmente alguns metais pesados. Assim, considerou-se importante avaliar se os chips de pneus usados na construção de estruturas de aterros sanitários, nomeadamente em sistemas de drenagem, originam a libertação de metais pesados quando sujeitos à acção de determinados factores ambientais, contaminando solos e águas e consequentemente colocando em risco o ambiente. Considerou-se relevante também simular situações extremas de acidez, de forma a verificar o comportamento dos chips de pneus usados em condições adversas (meio ácido e alcalino). Para o efeito realizaram-se ensaios de lixiviação a amostras de chips de pneus usados, com o intuito de verificar a libertação de determinados metais pesados. Como forma de comparação, foram realizados ensaios similares utilizando brita calcária, material usualmente aplicado em sistemas de drenagem. Foram também feitas recolhas de águas pluviais no aterro Amarsul – Palmela, onde se encontra inserido um sistema de drenagem constituído por chips de pneus usados. Desta forma, foi possível verificar a libertação de determinados metais em contexto real e laboratorial, e quais as implicações resultantes, confrontando os resultados com as limitações legislativas existentes. Assim, exceptuando o zinco em meio ácido (contexto laboratorial), todas as concentrações dos metais analisados não ultrapassaram os valores estabelecidos para classificar estes materiais como resíduos inertes, tanto em meio laboratorial como em contexto real, para os diferentes meios simulados.

**Palavras-chave:** chips de pneus usados; sistemas de drenagem; lixiviação; metais pesados.



With the recent ban on the disposal of used tires in landfills due to various drawbacks associated with this practice, the community in general was forced to find new uses for this type of material. During the management of used tires, processes such as reusing, retreading, recycling and energy recovery should be considered. The mechanical processing of used tires, resulting so-called tire chips. These are small pieces of tires, which have many applications in civil and geotechnical engineering. One of its applications is its use as drainage material in drainage systems of sanitary landfills, replacing mineral material such as crushed limestone, pebble or gravel. Beyond the environmental benefits associated with this substitution, as a result of the recovery of waste and conservation of natural resources, the use of this material has other physical and economic advantages.

Recently, it was also raised in the scientific community the question of the potential risk from used tires, to release some compounds present in their composition or used in their manufacturing process, particularly some heavy metals. Thus, it was considered important to assess whether the chips used in tire construction of structures of landfills, especially in drainage systems, originate or not the release of heavy metals when subjected to the action of certain environmental factors, contaminating soil and groundwater and consequently endangering the environment. It was also simulated extremes conditions of acidity, in order to verify the behavior of tire chips used in harsh conditions (acid and alkaline). For this purpose it was done some leaching tests on samples of tire chips, patented by the Portuguese company Recipneu – National Company of Tire Recycling, as MADRE®, in order to verify the release of certain heavy metals. They also made collections of rainwater into the landfill Amarsul - Palmela, which is inserted a drainage system consisting of tire chips. Therefore it was possible to verify the release of certain metals in field and laboratory, and what the resulting implications, comparing the results with the existing legislative limitations. Consequently, except for zinc (laboratory conditions), all analyzed concentrations of metals did not exceed the values set to classify these materials as inert waste, both in laboratory environment as in a real context.

**Keywords:** chips used tires, drainage systems, leaching, heavy metals.

## ABREVIATURAS E SIMBOLOGIA

---

<b>ACAP</b>	Associação do Comércio Automóvel de Portugal
<b>Al</b>	Alumínio
<b>Al (OH)<sub>3</sub></b>	Hidróxido de Alumínio
<b>ANIRP</b>	Associação Nacional dos Industriais de Recauchutagem de Pneus
<b>APIB</b>	Associação Portuguesa dos Industriais de Borracha
<b>Art.</b>	Artigo
<b>As</b>	Arsénio
<b>Ba</b>	Bário
<b>Bar</b>	Unidade de pressão
<b>BMB</b>	Betume modificado com Borracha
<b>°C</b>	Graus Celsius
<b>CAGER</b>	Comissão de Acompanhamento de Gestão dos Resíduos
<b>Cd</b>	Cádmio
<b>cm</b>	Centímetros
<b>Cr</b>	Crómio
<b>Cr<sup>3+</sup></b>	Crómio Trivalente
<b>Cr<sup>6+</sup></b>	Crómio Hexavalente
<b>Cu</b>	Cobre
<b>DL</b>	Decreto-Lei
<b>DN</b>	Diâmetro Nominal
<b>DQR</b>	Directiva-Quadro dos Resíduos
<b>EGF</b>	Empresa Geral de Fomento
<b>EM</b>	Estados Membros
<b>EN</b>	Norma Europeia
<b>EPA</b>	Environmental Protection Agency
<b>EPDM</b>	Borracha de Etileno-Propileno-Dieno
<b>ERTMA</b>	European Type & Rubber Manufacturers Association
<b>Fe</b>	Ferro

<b>Fe(OH)<sub>3</sub></b>	Hidróxido de ferro
<b>g/m<sup>2</sup></b>	Gramas por metro quadrado
<b>H<sup>+</sup></b>	Ião hidrogénio
<b>ha</b>	Hectares
<b>HCl</b>	Ácido clorídrico
<b>Hg</b>	Mercúrio
<b>HNO<sub>3</sub></b>	Ácido nítrico
<b>ICP-AES</b>	Espectroscopia de Emissão Atómica por plasma acoplado induzido (“Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry”)
<b>INETI</b>	Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial
<b>K</b>	Coeficiente de permeabilidade
<b>L</b>	Litros
<b>LECA</b>	Agregados de argila expandido (“ Lightweight Expanded Clay Aggregate”)
<b>LER</b>	Lista Europeia de Resíduos
<b>L/kg</b>	Litros por quilograma
<b>L/min</b>	Litros por minuto
<b>L/S</b>	Relação Líquido Sólido
<b>m<sup>3</sup></b>	metros cúbicos
<b>MADRE®</b>	Material Agregado Derivado de Resíduos
<b>Mn</b>	Manganésio
<b>mg</b>	Miligrama
<b>mg/L</b>	Miligrama por litro
<b>mg/kg</b>	Miligrama por quilograma
<b>µg/L</b>	Micrograma por litro
<b>µS/cm</b>	Microsiemens por centímetro
<b>mL</b>	Mililitros
<b>mL/min</b>	Mililitros por minuto
<b>mm</b>	Milímetros
<b>Mo</b>	Molibdénio
<b>MTD</b>	Melhores Tecnologias Disponíveis

<b>N</b>	Normalidade
<b>Ni</b>	Níquel
<b>OECD</b>	Organisation for Economic Co-operation and Development
<b>Pb</b>	Chumbo
<b>PEAD</b>	Polietileno de Alta Densidade
<b>PU</b>	Pneus Usados
<b>rpm</b>	Rotações por minuto
<b>RU</b>	Resíduos Urbanos
<b>Sb</b>	Antimónio
<b>Se</b>	Selénio
<b>SDAB</b>	Svensk Däckåtervinning AB (Organização Sueca de reciclagem de pneus).
<b>SGPU</b>	Sistemas de Gestão de Pneus Usados
<b>SIRAPA</b>	Sistema Integrado de Registo da Agência Portuguesa do Ambiente
<b>SIRER</b>	Sistema Integrado de Registo Electrónico de Resíduos
<b>UE</b>	União Europeia
<b>UNEP</b>	United Nations Environment Programme
<b>WBCSD</b>	World Business Council on Sustainable Development
<b>VFV</b>	Veículo em fim-de-vida
<b>VMA</b>	Valor Máximo Admissível
<b>VMR</b>	Valor Máximo Recomendado
<b>Zn</b>	Zinco



<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 ENQUADRAMENTO .....	3
1.2 RELEVÂNCIA .....	4
1.3 OBJECTIVOS .....	5
1.4 METODOLOGIA GERAL.....	5
1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	6
<b>CAPÍTULO 2 – PNEUS USADOS .....</b>	<b>9</b>
2.1 AS ORIGENS DO PNEU: BREVE ENQUADRAMENTO HISTÓRICO .....	11
2.2 O PNEU ACTUAL: PROPRIEDADES GERAIS .....	12
2.2.1 <i>Estrutura de um pneu</i> .....	12
2.2.2 <i>Composição de um pneu</i> .....	15
2.2.3 <i>Processo de fabrico de um pneu</i> .....	17
2.2.4 <i>Análise do ciclo de vida de pneus. Impactos associados à utilização de pneus</i> . 20	
2.3 VALORIZAÇÃO DE PNEUS USADOS.....	23
2.3.1 <i>Enquadramento legal</i> .....	25
2.3.1.1 <i>Política e legislação europeia</i> .....	26
2.3.1.2 <i>Política e legislação nacional</i> .....	30
2.3.2 <i>Reutilização, Recauchutagem, Reciclagem e Valorização Energética de Pneus Usados</i> .....	34
2.3.3 <i>Pneus usados: Tipos de materiais produzidos e aplicações</i> .....	36
2.3.4 <i>Aplicações de chips de pneus usados em sistemas de drenagem de Aterros Sanitários</i> .....	39
2.3.5 <i>Gestão de pneus usados em Portugal</i> .....	42
<b>CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO.....</b>	<b>49</b>
3.1 UTILIZAÇÃO DE CHIPS DE PNEUS USADOS MADRE® – RECIPNEU .....	51
3.1.1 <i>Tecnologia aplicada</i> .....	52
3.1.2 <i>Armazenamento da matéria-prima e chips de pneus usados</i> .....	53
3.2 UTILIZAÇÃO DE BRITA CALCÁRIA – AMARSUL .....	54
3.3 APLICAÇÃO DE CHIPS DE PNEUS USADOS COMO SUBSTITUTO DE MATERIAL DRENANTE NO ATERRO DA AMARSUL PALMELA.....	55
<b>CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA, MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>59</b>
4.1 OBJECTIVOS .....	61
4.2 CRONOGRAMA DO TRABALHO PRÁTICO. ....	62
4.3 ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO LABORATORIAIS.....	64
4.3.1 <i>Seleção e características das amostras</i> .....	64
4.3.2 <i>Planeamento experimental</i> .....	64
4.3.3 <i>Métodos, Materiais e procedimentos</i> .....	65
4.3.3.1 <i>Material</i> .....	66
4.3.3.2 <i>Procedimento</i> .....	67
4.3.3.3 <i>Seleção de elementos a analisar após lixiviação</i> .....	69
4.3.3.4 <i>Análise de elementos por espectroscopia de emissão atómica</i> .....	73

4.4	RECOLHA E ANÁLISE DE ÁGUAS PLUVIAIS – ATERRO AMARSUL .....	75
4.4.1	<i>Características das Recolhas</i> .....	75
4.4.2	<i>Planeamento experimental</i> .....	76
4.4.3	<i>Métodos, materiais e procedimentos</i> .....	76
4.4.3.1	<i>Material</i> .....	76
4.4.3.2	<i>Procedimento</i> .....	76
4.4.3.3	<i>Seleção de elementos a analisar por espectroscopia de emissão atómica</i> ..	78
<b>CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....</b>		<b>79</b>
5.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO LABORATORIAIS .....	81
5.2	RESULTADOS DA ANÁLISE DE AMOSTRAS DE ÁGUAS PLUVIAIS – ATERRO AMARSUL .....	92
<b>CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>		<b>95</b>
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	97
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>101</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>111</b>
ANEXO I - RESULTADOS GLOBAIS DOS ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO LABORATORIAIS .....		113
ANEXO II - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ATÓMICA POR PLASMA ACOPLADO INDUZIDO DOS ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO LABORATORIAIS .....		116
ANEXO III - RESULTADOS GLOBAIS DAS ÁGUAS PLUVIAIS RECOLHIDAS NO ATERRO AMARSUL -PALMELA .....		120
ANEXO IV - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ATÓMICA POR PLASMA ACOPLADO INDUZIDO DAS ÁGUAS PLUVIAIS RECOLHIDAS NO ATERRO DA AMARSUL – PALMELA .....		121

<b>Figura 2.1:</b> Primeiro pneu, patenteado por Thomson.....	11
<b>Figura 2.2:</b> Pneus fabricados por Dunlop.....	11
<b>Figura 2.3:</b> Comparação entre um pneu convencional (A) e um pneu radial (B).....	12
<b>Figura 2.4:</b> Principais componentes de um pneu.....	13
<b>Figura 2.5:</b> Processo de fabrico de um pneu ligeiro.....	19
<b>Figura 2.6:</b> Fluxograma da fabricação de pneus com identificação das matérias-primas utilizadas e resíduos gerados.....	20
<b>Figura 2.7:</b> Ciclo de Vida de um pneu.....	21
<b>Figura 2.8:</b> Níveis de tratamento de pneus usados e produtos resultantes.....	36
<b>Figuras 2.9:</b> Exemplos de aplicações de pneus inteiros (A).....	37
<b>Figura 2.10:</b> Exemplos de aplicações de pneus inteiros (B).....	37
<b>Figura 2.11:</b> Aplicação de chips de pneus numa fossa séptica.....	37
<b>Figura 2.12:</b> Aplicação de pedaços de pneus na construção de uma via rodoviária.....	37
<b>Figura 2.13:</b> Exemplos de aplicações de granulados de pneus (A).....	38
<b>Figura 2.14:</b> Exemplos de aplicações de granulados de pneus (B).....	38
<b>Figura 2.15:</b> Esquema de uma secção da cobertura final de um aterro.....	42
<b>Figura 2.16:</b> Aplicações do Ecovalor do SGPU.....	43
<b>Figura 2.17:</b> Modelo operacional do SGPU da Valorpneu.....	45
<b>Figura 2.18:</b> Evolução dos pneus colocados no mercado, gerados, recolhidos e existentes no período de 2003 a 2009.....	46
<b>Figura 2.19:</b> Destino dos pneus usados gerados recolhidos no âmbito do SGPU (toneladas) de 2003 a 2009, com maior detalhe para o ano de 2009.....	47



<b>Figura 3.1:</b> Localização da Recipneu e instalações.....	51
<b>Figura 3.2:</b> Zona envolvente das instalações da Recipneu.....	54
<b>Figura 3.3:</b> Localização das instalações da Amarsul.....	54
<b>Figura 3.4:</b> Vista aérea do Aterro da Amarsul em Palmela.....	55
<b>Figura 4.1:</b> Amostras de chips de pneus usados utilizadas nos procedimentos experimentais .....	64
<b>Figura 4.2:</b> Amostras de brita calcária utilizadas nos procedimentos experimentais.....	64
<b>Figura 4.3:</b> Sequência dos procedimentos experimentais realizados às amostras de chips de pneus usados e brita calcária.....	65
<b>Figura 4.4:</b> Ensaio de lixiviação.....	67
<b>Figura 4.5:</b> Sistema de filtração utilizado no procedimento experimental.....	68
<b>Figura 4.6:</b> Aspecto dos filtros após a filtração de eluatos resultantes da amostra de pneus usados.....	68
<b>Figura 4.7:</b> Procedimento experimental seguido nos ensaios de lixiviação laboratoriais.....	68
<b>Figura 4.8:</b> Sequência dos ensaios de lixiviação realizados, utilizando chips de pneus usados e brita calcária.....	69
<b>Figura 4.9:</b> Procedimento experimental seguido para a recolha e análise de águas pluviais.....	77
<b>Figura 5.1:</b> Gráficos de dispersão para os elementos Al, Cr, Cu, Fe, Mn e Mo, lixiviados em chips de pneus usados.....	86
<b>Figura 5.2:</b> Gráficos de dispersão para os elementos Ni, Sb, Cd, Ba, Pb e Zn, lixiviados em chips de pneus usados.....	87
<b>Figura 5.3:</b> Resultados obtidos para os parâmetros presentes no DL nº. 183/2009, com respectivo valor limite legislado para resíduos inertes.....	90



## ÍNDICE DE QUADROS

---

<b>Quadro 2.1:</b> Composição mássica média de um pneu para veículos ligeiros e para veículos pesados.....	15
<b>Quadro 2.2:</b> Exemplos de gamas de pesos de diferentes tipos de pneus.....	15
<b>Quadro 2.3:</b> Materiais utilizados no fabrico de pneus.....	16
<b>Quadro 2.4:</b> Síntese dos impactos potenciais associados a cada etapa do ciclo de vida de um pneu.....	22
<b>Quadro 2.5:</b> Tipos de aplicações analisadas no estudo da SDAB (1994) relativo à análise do ciclo de vida de pneus usados e resultados.....	23
<b>Quadro 2.6:</b> Síntese da Legislação em vigor relacionada com a gestão de Pneus Usados.....	26
<b>Quadro 2.7:</b> Propriedades físicas dos fragmentos de pneus.....	39
<b>Quadro 3.1:</b> Propriedades dos produtos MADRE ®TM e MADRE ®TL.....	53
<b>Quadro 3.2:</b> Estratigrafia proposta para sistema de encerramento em célula do Aterro Amarsul.....	56
<b>Quadro 4.1:</b> Cronograma do trabalho prático.....	63
<b>Quadro 4.2:</b> Lista de possíveis metais a analisar, segundo critérios de escolha.....	70
<b>Quadro 4.3:</b> Concentrações (µg/L) de elementos metálicos determinadas em ensaios de lixiviação consultados.....	72
<b>Quadro 4.4:</b> Comparação entre valores obtidos em ensaios de lixiviação consultados e limites estabelecidos pelo Decreto-lei 186/2009 para resíduos inertes.....	73
<b>Quadro 4.5:</b> Parâmetros operacionais do ICP-AES.....	74
<b>Quadro 4.6:</b> Limites de detecção do equipamento ICP-AES dos metais seleccionados.....	74
<b>Quadro 5.1:</b> Resumo dos resultados do primeiro conjunto de ensaios de lixiviação.....	81

<b>Quadro 5.2:</b> Determinação dos valores de pH ao longo de ensaios de lixiviação em meio ácido e meio natural, para chips de pneus usados.....	82
<b>Quadro 5.3:</b> Concentrações de metais pesados em chips de pneus, resultantes do primeiro conjunto de ensaios de lixiviação.....	83
<b>Quadro 5.4:</b> Concentrações de metais pesados em brita calcária, resultantes do primeiro conjunto de ensaios de lixiviação.....	84
<b>Quadro 5.5:</b> Concentração média dos metais analisados em pneus e valores máximos e mínimos lixiviados em chips de pneus usados, resultantes do primeiro conjunto de ensaios de lixiviação.....	85
<b>Quadro 5.6:</b> Resultados do teste de Krustal-Wallis, relativo ao comportamento dos metais, em valores de pH final 8 e 10 (em chips de pneus usados).....	88
<b>Quadro 5.7:</b> Concentrações de metais lixiviados em (mg/kg) em diferentes valores de pH segundo Selbes (2009).....	89
<b>Quadro 5.8:</b> Valores-limite de lixiviação para resíduos inertes, segundo DL nº. 183/2009.....	90
<b>Quadro 5.9:</b> Concentrações de metais obtidos para as águas pluviais (mg/L).....	93
<b>Quadro 5.10:</b> Resultados do teste de Krustal-Wallis, relativo ao comportamento dos metais existentes nas águas pluviais recolhidas nos dois depósitos.....	94
<b>Quadro A.1.1:</b> Resultados globais do ensaio com chips, realizado em meio ácido.....	114
<b>Quadro A.1.2:</b> Resultados globais do ensaio com chips, realizado em meio básico.....	114
<b>Quadro A.1.3:</b> Resultados globais do ensaio com chips, realizado em meio natural.....	115
<b>Quadro A.1.4:</b> Resultados globais do ensaio com brita calcária, realizado em meio ácido.....	115
<b>Quadro A.1.5:</b> Resultados globais do ensaio com brita calcária, realizado em meio natural.....	116
<b>Quadro A.2.1:</b> Resultados do ensaio de lixiviação em meio ácido, para chips de pneus usados.....	117

<b>Quadro A.2.2:</b> Resultados do ensaio de lixiviação em meio natural, para chips de pneus usados.....	118
<b>Quadro A.2.3:</b> Resultados do ensaio de lixiviação em meio básico, para chips de pneus usados.....	118
<b>Quadro A.2.4:</b> Resultados do ensaio de lixiviação em meio ácido para brita calcária.....	119
<b>Quadro A.2.5:</b> Resultados do ensaio de lixiviação em meio natural, para brita calcária.....	119
<b>Quadro A.2.6:</b> Valores de brancos.....	120
<b>Quadro A.3.1:</b> Data e hora de recolha e valores de pH e condutividade para as águas pluviais recolhidas no aterro da Amarsul – Palmela.....	121
<b>Quadro A.4.1:</b> Resultados totais de ICP-AES das amostras de águas pluviais recolhidas no aterro Amarsul – Palmela .....	122





## **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

---





## Capítulo 1 – Introdução

---

### 1.1 Enquadramento

---

Em 2009, foram colocados no mercado 78.349 toneladas de pneus novos tendo-se gerado 86.959 toneladas de pneus usados. Desta quantidade, 53,6 % sofreu reciclagem, 20,8% foi encaminhada para recauchutagem, 24,4% para valorização energética e apenas 1,1% para reutilização (Valorpneu, 2010a).

A proibição da deposição de pneus usados em aterros preconizada pela Directiva nº 1999/31/CE do Conselho, de 26 de Abril, referente a aterros para deposição de resíduos, aliada à preocupação crescente com temas como a sustentabilidade e reciclagem, levou a que se procurassem novas formas de valorização deste tipo de material, em detrimento da sua deposição ou eliminação.

Uma das alternativas de valorização deste tipo de material é a reciclagem física, obtendo-se fragmentos de pneus de diversas dimensões e com variadas aplicações. Do material resultante, obtém-se os denominados chips de pneus usados, que resultam apenas da etapa de corte dos pneus, não sofrendo qualquer outro processo. Este tipo de material é bastante aplicado em projectos de construção civil e/ou geotecnia, sobretudo como material de enchimento leve, drenagem e fundações. Uma das suas aplicações específica é a sua utilização em sistemas de drenagem de aterros sanitários, funcionando como material substituto de materiais agregados naturais inertes, como a brita calcária, o seixo ou cascalho (McIsaac e Rowe, 2005; Cabeças e Dores, 2008).

Apesar de este tipo de aplicação, em diversos países (e.g Estados Unidos da América e Canadá) ser já uma prática corrente, em Portugal a sua utilização é praticamente nula, existindo apenas um aterro sanitário com esta aplicação. Trata-se de uma célula do aterro de Palmela da Amarsul, Sistema Multimunicipal da Margem Sul do Tejo, responsável pela gestão adequada de resíduos urbanos e equiparados, onde se efectuou a aplicação de chips de pneus, como substituto de material mineral drenante, na camada de drenagem da sua estrutura de selagem.

Embora a substituição da utilização de materiais naturais por materiais reciclados ser uma mais-valia, é de real importância desenvolver a investigação em torno deste tipo de elementos, de forma a conhecer os seus potenciais riscos, quer a nível ambiental, quer a

nível geotécnico, bem como garantir os requisitos necessários à sua aplicação (Mello et al, 1998, Reddy e Marella, 2001). Do ponto de vista geotécnico, importa avaliar as suas propriedades mecânicas e o comportamento dos materiais reciclados. Do ponto de vista ambiental, importa analisar principalmente os lixiviados resultantes do contacto da água com os chips de pneus usados. Brophy e Graney (2004) referem que a principal preocupação ambiental relativa à utilização deste tipo de material em aplicações de construção civil e/ou geotecnia, consiste exactamente na potencial libertação de compostos orgânicos e metais presentes na composição dos pneus.

## 1.2 Relevância

---

Vários autores (e.g Humphrey e Katz, 2001; Brophy e Graney, 2004; Yoon *et al.*, 2005; Aydilek *et al.*, 2006) têm vindo a estudar a temática da utilização de chips de pneus usados em aplicações de engenharia civil e geotecnia, recorrendo a ensaios laboratoriais e a ensaios de campo, de forma a prever o comportamento deste tipo de material quando submetido a lixiviação, e a sua compatibilidade com o solo e água.

Para determinar as características de lixiviação de qualquer produto, são frequentemente utilizados ensaios de lixiviação por contacto. A aplicação deste tipo de ensaios é de carácter simples, encontrando-se referenciada em alguns documentos normativos, como é o caso da directiva Aterros – Directiva nº 1999/31/CE, através da Norma Europeia EN 12457/4 para a classificação de resíduos em inertes, não perigosos e perigosos. Porém, tal como Edil et al (2004) referem, visto que a relação sólido/líquido (L/S) utilizada nos ensaios, a sua duração e a extracção do líquido, variam de investigação para investigação, torna-se difícil a comparação dos resultados dos diversos trabalhos, e a sua extrapolação para a realidade.

Dos diversos trabalhos analisados, para além da variação das características dos ensaios já acima enunciadas, verifica-se que os elementos analisados são vastos e distintos, não coincidindo entre os diversos artigos, dificultando uma vez mais a comparação e utilização desses resultados. Assim, este trabalho surge da necessidade de uma compilação e comparação consistente da libertação de diferentes elementos metálicos constituintes dos pneus usados, oriundos das matérias-primas utilizadas, e dos aditivos utilizados no seu processo de fabrico.

## 1.3 Objectivos

---

O objectivo geral do presente trabalho, consiste em verificar se os fragmentos de pneus usados (denominados de chips) possuem, alguma perigosidade associada à sua utilização em sistemas de drenagem em aterros sanitários. Devido à função deste tipo de material na aplicação em estudo (sistemas de drenagem de cobertura final de aterros) considerou-se como principal medida de perigosidade a presença de metais pesados em águas que permanecem em contacto com os chips de pneus usados, num determinado período de tempo. Considera-se também relevante verificar se a libertação de metais pesados destes materiais para a água de contacto, possui alguma relação com o nível de acidez desta.

Em termos concretos, os objectivos práticos da presente dissertação são os seguintes:

1. Determinar a presença e concentração de metais pesados em eluatos (águas de contacto) de amostras nacionais de chips de pneus usados, utilizando diferentes níveis de pH da água. Da mesma forma, determinar a presença e concentração de metais pesados em eluatos de amostras de brita calcária, produto geralmente utilizado nas camadas drenantes de aterros.
2. Determinar a presença e concentração de metais pesados em amostras de águas pluviais recolhidas em contexto real, em sistemas de drenagem constituídos por chips de pneus usados e brita calcária, existentes no aterro sanitário da Amarsul, em Palmela.
3. Verificar a perigosidade destes materiais, comparando os valores obtidos com os valores assinalados na legislação nacional em vigor e realizando a comparação entre os dois tipos de material analisados (chips de pneus usados e brita calcária), tanto em meio laboratorial como em contexto real.

## 1.4 Metodologia geral

---

Metodologicamente, o presente trabalho foi estruturado em duas principais fases, de forma a atingir os objectivos propostos.

A primeira fase consistiu numa pesquisa documental em livros, relatórios técnicos, dissertações, artigos científicos, actas de conferências e legislação, disponibilizados em diferentes formatos. Esta fase permitiu um maior conhecimento acerca da gestão de pneus

usados, nomeadamente a legislação existente, sistemas integrados de gestão, processos de reutilização e valorização de pneus usados, impactos associados à utilização de pneus, mecanismos de envelhecimento de pneus, entre outros.

A segunda fase do presente trabalho, baseou-se na realização de ensaios de lixiviação com amostras de chips de pneus usados produzidos numa das maiores empresas recicladora de pneus em território nacional (Recipneu), como forma de simulação da acção das águas pluviais sobre este material. Como forma de comparação realizaram-se ensaios paralelos utilizando amostras de brita calcária, material normalmente aplicado em sistemas de drenagem em aterros sanitários. A fim de simular os efeitos do nível de acidez das águas pluviais, foram utilizados diferentes níveis de pH nos ensaios para os dois tipos de materiais. Fez-se assim a determinação do pH, condutividade e metais pesados presentes nos respectivos eluatos. Da mesma forma foram feitas várias recolhas e análise dos mesmos elementos em águas pluviais submetidas à passagem num sistema de drenagem de cobertura final, constituído por chips de pneus usados em contexto real, existente no Aterro Sanitário Amarsul – Palmela. Foram também feitas recolhas de águas pluviais submetidas à passagem num sistema de drenagem de cobertura final, constituído por brita calcária, existente no mesmo aterro, de forma a permitir uma comparação entre os dois tipos de material utilizado.

## 1.5 Organização da dissertação

---

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos. O **primeiro capítulo** consiste numa abordagem sobre o enquadramento e relevância do tema. São ainda expostos os principais objectivos deste trabalho, assim como a metodologia utilizada para a sua concretização, e estrutura da dissertação.

O **segundo capítulo** consiste na compilação resultante da revisão bibliográfica realizada, acerca da definição e caracterização de pneus e pneus usados, análise do ciclo de vida destes e dos impactos associados a cada fase, política e legislação aplicada a pneus usados, caracterização do sistema de gestão de pneus usados e situação actual, assim como as diversas tecnologias de valorização e reutilização de pneus usados.

O **terceiro capítulo** inclui uma breve descrição dos casos de estudo, ou seja dos chips de pneus usados fornecidos pela empresa Recipneu, e brita calcária fornecida pela Amarsul. Esta descrição aborda principalmente os aspectos relacionados com a sua localização, tecnologias utilizadas, e condições de armazenamento das amostras até à sua utilização no

presente trabalho. Da mesma forma é também descrita a concepção e estrutura dos sistemas de drenagem de cobertura final, constituintes do Aterro Sanitário da Amarsul em Palmela.

No **quarto capítulo** descreve-se a metodologia utilizada na componente prática, incluindo-se os objectivos, a selecção e características das amostras, o planeamento experimental, assim como os métodos, materiais e procedimentos utilizados.

O **quinto capítulo** é composto pela análise e discussão dos resultados obtidos da componente experimental, nomeadamente dos ensaios de lixiviação realizados aos dois tipos de material utilizados (chips de pneus usados e brita calcária) em meio laboratorial e ainda a discussão resultante da análise de águas pluviais dos sistemas de drenagem de chips de pneus usados e brita calcária, no aterro Amarsul em Palmela.

O **sexto capítulo** consiste numa síntese conclusiva acerca do trabalho realizado, onde se inclui os principais resultados assim como as limitações e deficiências reveladas. São também indicadas algumas propostas de abordagem para trabalhos futuros.



## **CAPÍTULO 2 – PNEUS USADOS**

---





## Capítulo 2 – Pneus Usados

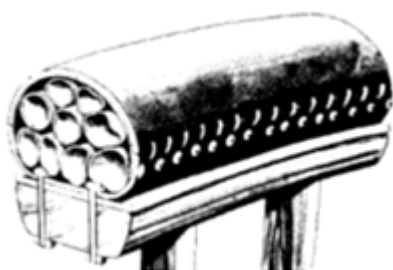
---

### 2.1 As origens do pneu: breve enquadramento histórico

---

As origens do pneu remontam ao século XIX. Em 1839, Charles Goodyear descobriu acidentalmente que a mistura de borracha com enxofre e carbonato de chumbo, sujeita a aquecimento, adquiria propriedades elásticas estáveis não voltando a derreter. Assim, já em 1844, Goodyear patenteou a sua descoberta como o processo de vulcanização da borracha (General Tire, 2010).

Em 1845, o engenheiro escocês Robert W. Thomson, patenteou o primeiro pneu (figura 2.1), baptizando-o de “aerial wheel”. Este consistia num conjunto de finos tubos preenchidos com ar, e envolvidos por uma capa de couro. Porém, Thomson não comercializou o seu produto e este acabou por cair no esquecimento. Só com a invenção da bicicleta, o pneu manifestou o seu sucesso. Em 1888, o irlandês John Boyd Dunlop, tornou-se o segundo inventor do pneu, patenteando novamente o pneu, desta vez aplicado às bicicletas (figura 2.2) (General Tire, 2010).

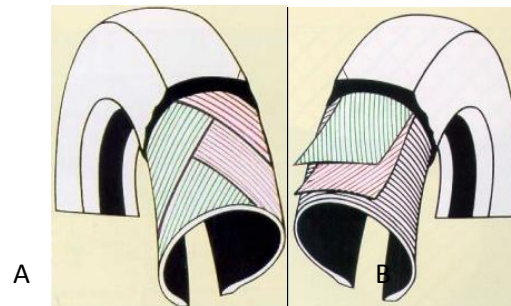


**Figuras 2.1 e 2.2:** Primeiro pneu, patenteado por Thomson (blackcircles, 2010) e pneus fabricados por Dunlop (dw-world, 2010).

Em resposta aos desenvolvimentos de Dunlop, os irmãos André e Edouard Michelin, em 1891 inventaram um pneu de mais fácil manutenção, que enchia através de uma válvula e permitia a sua remoção e substituição em caso de dano. Até essa altura os pneus eram fixos demorando mais de três horas para serem substituídos. Estes novos pneus são considerados os antepassados dos pneus actuais (APA, 2008).

Com o aparecimento das máquinas automóveis, e a sua evolução, os pneus foram também melhorados, tornando-se cada vez mais sofisticados. Já em 1946, a Michelin patenteou o pneu radial (figura 2.3). Este é constituído por uma carcaça flexível, disposta em arcos

radiais, em vez da sobreposição de lonas cruzadas, utilizadas até então nos pneus convencionais. O pneu radial possui também uma cintura metálica que estabiliza a banda de rolamento, fazendo com que o trabalho desta seja independente dos flancos. Actualmente, ainda se mantém a utilização deste tipo de pneus. (Michelin, 2010).



**Figura 2.3:** Comparação entre um pneu convencional (A) e um pneu radial (B) (Adaptado de Michelin, 2010).

## 2.2 O pneu actual: Propriedades Gerais

---

O pneu actual é essencialmente, um toróide oco feito de borracha, que para a sua utilização, é cheio de ar comprimido. É capaz de suportar mais de 50 vezes o seu peso, ao longo de vários anos e de milhões de ciclos (Shulman, 2004).

De acordo com o Decreto-Lei nº 111/2001, de 6 de Abril, relativo ao estabelecimento de uma hierarquia na gestão dos pneus usados, define-se pneu como:

“ (...) Os pneus utilizados em veículos motorizados, aeronaves, reboques, velocípedes e outros equipamentos, motorizados ou não motorizados, que os contenham”.

Segundo o mesmo documento entende-se como pneu usado “ (...) quaisquer pneus de que o respectivo detentor se desfaça ou tenha a intenção ou a obrigação de se desfazer e que constituam resíduos na acepção da alínea a) do art. 3º do Decreto-Lei nº. 239/1997, de 9 de Setembro, ainda que destinados a reutilização (recauchutagem) ”.

### 2.2.1 Estrutura de um pneu

---

Os pneus são constituídos por vários componentes, que incluem diversas partes, tipos de aço e compostos de borracha. Independentemente da aplicação, todos os pneus devem cumprir uma série de funções fundamentais como amortecimento, estabilidade dimensional,

resistência à abrasão e durabilidade (WBCSD, 2008a). Segundo a Valorpneu (2010b), as diversas partes que compõe um pneu, possuem propriedades muito diferentes, e o seu fabrico implica uma grande precisão. Na figura 2.4 estão representados as principais estruturas constituintes de um pneu.



**Figura 2.4:** Principais componentes de um pneu (Adaptado de Valorpneu, 2010b).

De uma forma geral, as estruturas componentes indicadas na figura 2.4, apresentam as seguintes características e/ou funcionalidades:

- **Talão (1):** estrutura que permite que o pneu fique solidário com a jante. É constituído por um núcleo de arame de aço, envolto em borracha (Campos, 2006). Segundo a Valorpneu (2010b) a sua função principal é transmitir os binários do motor e de travagem da jante à área de contacto com o solo.
- **Revestimento (2 e 3):** corresponde a uma capa de borracha sintética. É constituída por uma camada que permite a impermeabilidade ao ar e substitui as câmaras-de-ar. Segundo Campos (2006) constitui cerca de 12% do total de borracha de um pneu novo.
- **Carcaça (4):** estrutura que retém o ar sob pressão, suportando o peso total do veículo (Brazil Tires, 2010). Constituída por finos cabos de fibras têxteis dispostas em ângulos rectos, colados à borracha. Estes cabos permitem a resistência do pneu à pressão. Num pneu de automóvel, podem existir cerca de 1400 cabos, que resistem individualmente a uma força de 15 kg (Valorpneu, 2010b).

- **Lonas de reforço (5 e 6):** também chamadas de cintas, são feitas de cabos de aço muito finos e resistentes. São cruzadas obliquamente e coladas de uma forma sobreposta. O cruzamento dos seus fios com os da carcaça forma triângulos indeformáveis (Valorpneu, 2010b). Denominada triangulação, esta disposição assegura o enrijecimento da parte superior. Estas lonas que cinturam a periferia do pneu têm uma função muito complexa devendo ser suficientemente rígidas no sentido circunferencial do pneu para não esticarem sob o efeito da força centrífuga, de maneira a controlar perfeitamente o diâmetro do pneu, quaisquer que sejam as condições de utilização. Devem também ser rígidas transversalmente, para resistir aos esforços de deriva. Mas ao mesmo tempo, devem ser suficientemente flexíveis no sentido vertical para “absorver” as deformações causadas pelas variações de superfície e outros obstáculos. Para fabricar estas lonas, o aço deve ser colado à borracha. A perfeita coesão entre estes materiais é indispensável (Bridgestone, 2010).
- **Banda de rolamento (7):** disposta sobre as lonas de reforço, esta parte do pneu é a que fica em contacto com a estrada e por isso, tem que resistir a diversos esforços. A mistura que a constitui deve ser aderente em todos os tipos de solos, resistir ao desgaste, à abrasão e aquecer o menos possível (Valorpneu, 2010b). Para Campos (2006) esta banda é também designada por piso, e representa cerca de 23% da massa de borracha de um pneu novo. A banda de rolamento possui diversos **sulcos de drenagem (8)** essenciais para permitir a aderência do pneu ao piso, principalmente em contacto com a água.
- **Ombro (9):** é o apoio do pneu em curvas e manobras. Denominado também por flanco de borracha macia, protege o pneu contra os choques susceptíveis de causar danos na carcaça, como pequenos choques com o passeio, ou passagem em buracos (Valorpneu, 2010b).
- **Paredes laterais (10):** são as laterais da carcaça. São revestidas por uma mistura de borracha com alto grau de flexibilidade e alta resistência à fadiga (Brazil Tires, 2010).

## 2.2.2 Composição de um pneu

Segundo Shulman (2004), a composição dos pneus produzidos é praticamente idêntica para os diversos fabricantes existentes. O quadro 2.1 apresenta as composições mássicas de um pneu para veículos ligeiros e veículos pesados, onde se verificam as principais diferenças em termos de composição para as duas classes de pneus. Estas diferenças devem-se principalmente às diferentes funções e condições de serviço que os pneus de veículos ligeiros e veículos pesados possuem durante a sua vida útil (UNEP, 2008).

**Quadro 2.1:** Composição mássica média de um pneu para veículos ligeiros e para veículos pesados (adaptado de Shulman, 2004).

Material	Ligeiros (%)	Pesados (%)
<b>Borracha/ elastómeros</b>	<b>43</b>	<b>45</b>
<b>Negro de fumo e sílica</b>	<b>27</b>	<b>20</b>
<b>Metais</b>	<b>11</b>	<b>22</b>
<b>Têxteis</b>	<b>5</b>	<b>1</b>
<b>Óleos</b>	<b>8</b>	<b>8</b>
<b>Aditivos (enxofre e outros agentes de vulcanização, óxido de zinco, antioxidantes, antiozonantes, promotores de adesão, etc.)</b>	<b>6</b>	<b>6</b>

Aproximadamente 80% do peso de um pneu para veículos ligeiros e 75% de pneu para veículos pesados são compostos de borracha. O quadro 2.2 apresenta as diferentes gamas de peso, para os diferentes tipos de pneus existentes.

**Quadro 2.2:** Exemplos de gamas de pesos de diferentes tipos de pneus (adaptado de UNEP, 1999).

Tipo pneus (Veículo)	Peso (kg)
<b>Ligeiro de passageiros</b>	6,5-9,0
<b>Carrinhas</b>	11,0
<b>Veículos pesados de mercadorias</b>	50,0
<b>Camiões de longo curso</b>	55,0-80,0
<b>Veículos agrícolas</b>	100,0

Os diferentes materiais utilizados no fabrico de um pneu provêm de diversas fontes, e cada um deles possui uma função específica para o aspecto final do pneu, e para a sua eficaz utilização. O quadro 2.3 apresenta detalhadamente os diversos materiais constituintes de um pneu, referindo qual a importância da sua utilização neste produto.

**Quadro 2.3:** Materiais utilizados no fabrico de pneus (adaptado de Atech Group, 2001).

<b>Material</b>	<b>Fonte</b>	<b>Aplicação</b>
<b>Borracha Natural</b>	Obtida principalmente da seiva da árvore <i>Hevea brasiliensis</i>	Normalmente a borracha natural representa entre 30 a 40% do total de elastómeros de um pneu de veículos ligeiros e entre 60 a 80% de um pneu de veículos pesados.
<b>Borracha Sintética</b>	Petroquímicos	Geralmente a borracha sintética representa entre 60 a 70% do total de elastómeros de um pneu de veículos ligeiros e entre 20 a 40% de um pneu de veículos pesados
<b>Cabos de aço e fios metálicos, incluindo os materiais de revestimento e activadores, bronze/estanho/zinco</b>	Mineral extraído	Utilizado para fornecer rigidez e resistência aos pneus
<b>Tecidos reforçados</b>	Poliéster, rayon e nylon	Utilizado para fornecer resistência estrutural e às carcaças de veículos ligeiros
<b>Negro de fumo e sílica amorfa</b>	Negro de fumo provém de reservas petrolíferas; sílica amorfa é obtida a partir do mineral silício e carbonato de sódio. Pode ter origem natural ou sintética	Fornecem durabilidade e resistência ao desgaste e rompimento
<b>Óxido de Zinco</b>	Mineral extraído ou obtido através da reciclagem de zinco	Activador de vulcanização. Após a vulcanização encontra-se nas ligações de borracha nos pneus.
<b>Enxofre (incluindo compostos)</b>	Mineral extraído ou derivado de gás ou petróleo	Principal agente da vulcanização
<b>Outros aditivos e solventes anti-idade, auxiliares de processamento, aceleradores, agentes de vulcanização, amaciadores e enchimentos</b>	Natural ou sintética	Fabrico de compostos de borracha e manipulação das suas propriedades finais.
<b>Borracha reciclada</b>	Reutilização de pneus usados ou outros produtos de borracha	Utilizado em alguns compostos de borracha na manufactura de novos produtos e materiais recauchutados

### 2.2.3 Processo de fabrico de um pneu

---

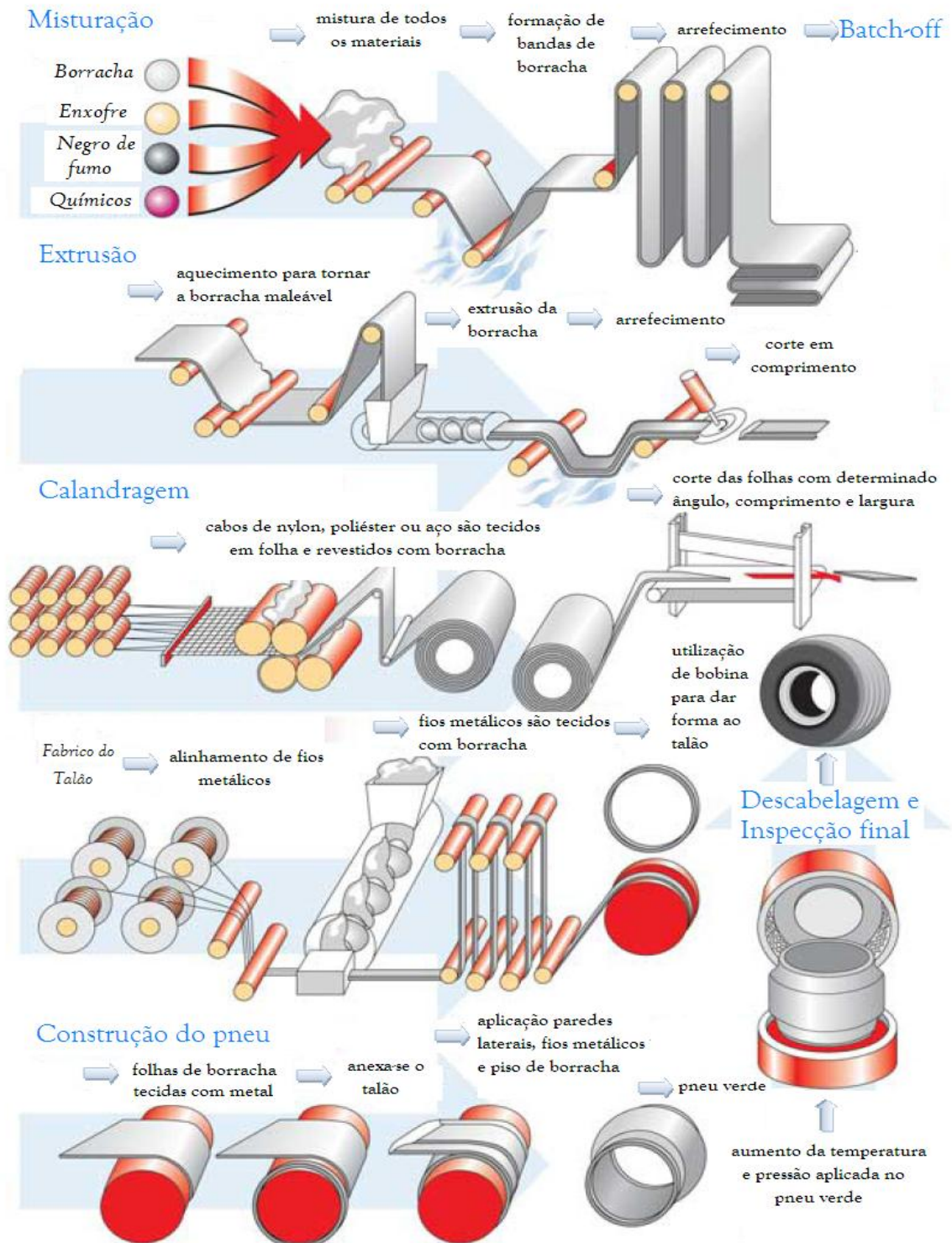
Segundo o INETI (2000) o processo de fabrico de pneus ligeiros e comerciais, pneus para scooters, pneus para veículos agrícolas e pneus para veículos pesados é semelhante e inclui, em geral, as seguintes operações (figura 2.5):

- **Pesagem:** nesta operação são pesadas as matérias-primas necessárias às várias formulações, tais como: borrachas de natureza vária, pigmentos, negro de fumo, retardadores, activadores de vulcanização, etc. Esta pesagem pode ser manual ou automática.
- **Misturação:** esta operação tem como objectivo a dispersão homogénea dos diversos ingredientes e é levada a cabo em misturadores que podem ser de dois tipos: misturadores internos (banbury) e misturadores de rolos. O primeiro possui uma câmara dentro da qual estão dois rotores, de forma especial, que rodam em sentidos opostos e a velocidades diferentes que misturam os diferentes ingredientes. Já nos misturadores de rolos, existem dois rolos paralelos e horizontais que rodam em sentido inverso e a velocidades diferentes. Em qualquer um dos dois, o atrito produzido pelo movimento de rotação dos rolos contra a borracha produz o aquecimento desta e facilita a sua mistura, podendo as temperaturas chegar a 180 °C. Estes misturadores possuem um circuito de refrigeração que impede a subida da temperatura para valores demasiado elevados. No fim desta operação, a borracha sai ainda quente, e na forma de uma banda onde as superfícies facilmente aderem umas às outras.
- **Bacth-off:** Nesta operação, a borracha quente passa por uma solução aquosa, que constitui um tratamento anti-aderente. As tiras de borracha, após arrefecimento sem ar, são cortadas e empilhadas para utilização posterior. A borracha pode então seguir para as operações de formação, como a calandragem de tecidos ou metais, ou a extrusão de componentes.
- **Extrusão:** Esta operação permite obter, após aquecimento a cerca de 150 °C, a forma e espessura desejada fazendo passar a borracha pela extrusora. A borracha é comprimida através da fieira, que pode ter diversas formas de acordo com o perfil final pretendido.
- **Construção ou montagem do pneu:** Geralmente, esta operação é realizada numa máquina de construção de pneus, onde numa primeira fase, se monta a carcaça



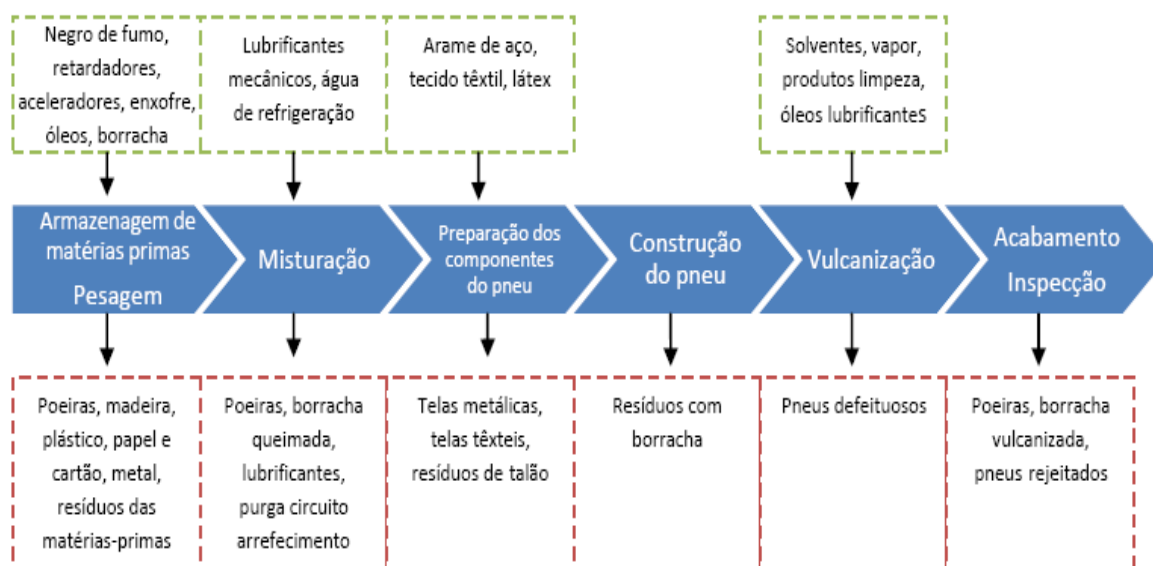
para posteriormente se adicionar as telas metálicas e o piso, completando assim o pneu. O tipo de componentes adicionados em cada uma das fases é função do tipo de pneu a construir. Desta operação resulta o chamado pneu verde, que posteriormente é submetido à vulcanização.

- **Vulcanização:** após a pintura do pneu, este é sujeito à vulcanização em prensas. Nesta fase, o pneu adquire a sua forma e propriedades elastoméricas finais. Para dar forma ao pneu introduz-se no interior deste um saco, que na altura em que se fecha a prensa é insuflado, comprimindo o pneu em direcção ao molde. O pneu é sujeito a aquecimento indirecto por vapor, atingindo temperaturas próximas de 200 °C.
- **Descabelagem:** Nesta fase é retirada a borracha em excesso, que resulta da existência de orifícios no molde. Em seguida, o pneu passa para a última fase do processo, a inspecção final.
- **Inspecção final:** o controlo da qualidade dos pneus produzidos faz-se através de uma inspecção visual e nalguns casos utilizando uma máquina de raios x. Todos os pneus fazem um teste de uniformidade radial e lateral, sendo ainda alguns testados numa máquina de balanceamento.



**Figura 2.5:** Processo de fabrico de um pneu ligeiro (adaptado de Bridgestone, 2010).

Em qualquer uma das etapas do processo de fabrico de um pneu é necessária a utilização de matérias-primas e/ou promove-se a geração de resíduos. A figura 2.6 representa o fluxograma de matérias-primas e resíduos gerados em cada etapa.

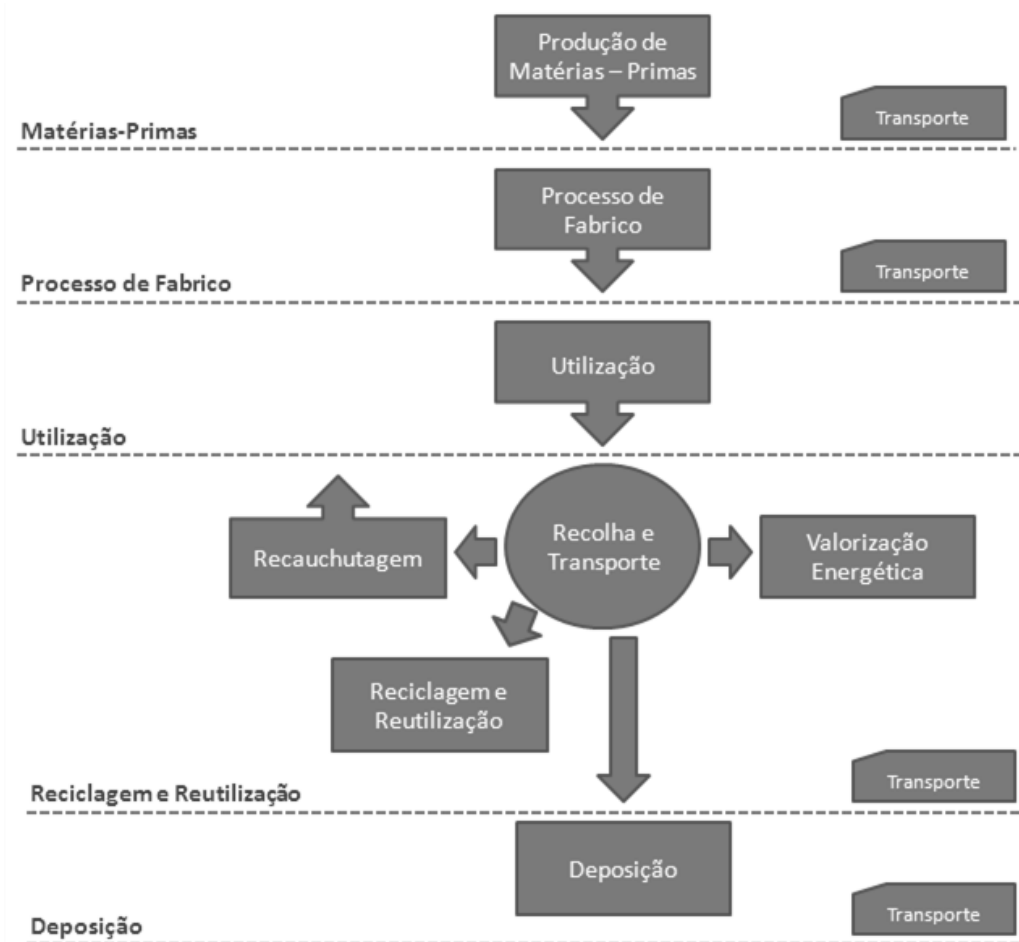


**Figura 2.6:** Fluxograma da fabricação de pneus com identificação das matérias-primas utilizadas e resíduos gerados (adaptado de INETI, 2000).

#### 2.2.4 Análise do ciclo de vida de pneus. Impactos associados à utilização de pneus

O debate sobre os possíveis impactos ambientais dos pneus e produtos de borracha, é geralmente dominado pelos riscos e impactos associados aos depósitos de pneus acima do solo. Estes depósitos fornecem um impacto visual forte e para além disso, potenciam a ocorrência de incêndios e a criação de locais de proliferação de mosquitos e parasitas. Porém o impacto ambiental dos produtos de borracha vai para além destes, aparecendo em todos os estágios da vida dos produtos (Atech Group, 2001).

É de real importância considerar todos os impactos, de forma a garantir que a gestão de resíduos não resulte apenas de uma transferência de impactos para diferentes estágios no ciclo de vida, ou para diferentes tipos de meio receptor, mas sim abordando todos os impactos, de uma forma global. Assim, o ciclo de vida de produtos de borracha encontra-se ilustrado na Figura 2.7.



**Figura 2.7:** Ciclo de vida de um Pneu (adaptado de Atech Group, 2001).

Quando se procede à descrição dos impactos associados ao ciclo de vida de um pneu, normalmente utilizam-se termos potenciais. Isto deve-se à relevância que determinados factores locais podem ter. Por exemplo, os pneus contêm determinada concentração de elementos tóxicos, encontrando-se estes estritamente ligados numa matriz sólida, a borracha vulcanizada. A taxa a que estes elementos são libertados para o ambiente, é em diversas circunstâncias, muito baixa. No entanto, esta taxa depende de factores locais ambientais (e.g. temperatura), e as dimensões do eventual impacto, dependem também da sensibilidade do meio receptor, e da presença de plantas, animais ou população humana, que podem ser afectados (Atech Group, 2001). Todos estes factores variam de local para local, e consequentemente os impactos sofrem também variação. Os possíveis impactos de cada etapa do ciclo de vida de um pneu, encontram-se resumidos no quadro 2.4.

**Quadro 2.4:** Síntese dos impactos potenciais associados a cada etapa do ciclo de vida de um pneu  
(adaptado de Atech Group, 2001).

<b>Etapa do Ciclo de Vida</b>	<b>Processos Incluídos</b>	<b>Impactos Associados</b>
<b>Matéria-Prima</b>	Produção de borracha natural Produção de borracha sintética Produção de aço e tecido Produção de vários aditivos incorporados nos pneus Transporte	Depleção de Recursos Agricultura (borracha natural) Uso de energia Gases de efeito e estufa e outras emissões Resíduos líquidos e sólidos
<b>Processo de Fabrico</b>	Produção de estruturas básicas de pneus Montagem de pneus Processo de vulcanização	Uso de energia Gases de efeito e estufa e outras emissões Resíduos líquidos e sólidos
<b>Utilização</b>	Uso do produto para as finalidades pretendidas	Uso de energia Emissões de poeiras Desgaste do solo
<b>Reciclagem e Reutilização</b>	Processo de corte e fragmentação de pneus Aproveitamento de Energia Utilização de pneus ou fragmentos para diversas aplicações	Uso de energia Gases de efeito e estufa e outras emissões Resíduos líquidos e sólidos
<b>Deposição</b>	Deposição em terreno Depósitos ilegais e incontrolados	Lixiviação de elementos Fluxo livre de gás e lixiviados no solo Incêndios Mosquitos e outros parasitas Erosão Impacto Visual
<b>Transporte</b>	Transporte de matérias-primas Transporte de pneus novos Transporte de PU para reciclagem e reutilização Transporte de resíduos de pneus	Uso de Energia Gases de efeito e estufa e outras emissões Ruído

Kromer *et al.* (1999) apresentaram uma análise de ciclo de vida de um pneu, onde compararam os impactos associados ao fabrico de um pneu novo, e o processo de recauchutagem de um pneu usado. Concluíram que é necessário cerca do dobro de energia e de ar, 25 vezes mais água e 1,4 vezes mais de recursos para o primeiro processo referido.

As emissões atmosféricas, e resíduos produzidos são também significativamente mais elevados para o processo de fabrico de um pneu novo.

Existem ainda dados acerca do ciclo de vida da utilização de pneus usados, que fornecem informação acerca dos impactos das diversas utilizações possíveis deste recurso. Em 1994, a empresa sueca SDAB, realizou uma comparação entre os impactes ambientais de diferentes cenários para a utilização de PU. Neste ciclo de vida, a produção de pneus não é incluída, e por isso, algumas matérias-primas, produtos químicos e aditivos utilizados em pequenas quantidades, não são referidos no estudo. Da análise dos resultados de cada utilização presentes no quadro 2.5, a SDAB concluiu que o material granulado resultante da reciclagem de pneus para aplicação em campos de futebol, foi o que apresentou menores impactos associados, enquanto que a reciclagem de PU para utilização em asfalto revelou-se como a utilização com maiores impactos associados. Porém os mesmos autores referem que a utilização de PU é ambientalmente mais vantajosa, comparativamente à utilização de matérias-primas virgens.

**Quadro 2.5:** Tipos de aplicações analisadas no estudo da SDAB (1994) relativo à análise do ciclo de vida de pneus usados e resultados.

<b>Material e Tipo de utilização</b>	<b>Material/Combustível de substituição</b>	<b>Posição ambiental</b>
<b>Material granulado da reciclagem de pneus usado em campos de futebol</b>	EPDM (borracha)	1
<b>Incineração de pneus em fornos de cimenteira</b>	Minério de ferro e Carvão	2
<b>Chips de pneus como material de drenagem de aterros</b>	Cascalho grosseiro	3
<b>Reutilização de pneus para isolamento acústico</b>	LECA (agregados de argila expandidos)	3
<b>Incineração de pneus em unidade de aquecimento urbano</b>	Carvão e combustíveis renováveis	3
<b>Material granulado de reciclagem usado em asfalto</b>	Cascalho extra grosseiro e betume	4

## 2.3 Valorização de pneus usados

---

Nas últimas décadas, com o crescimento mundial da indústria automóvel, e a crescente utilização do transporte rodoviário como meio preferido de deslocação, a produção de pneus sofreram um enorme aumento. Consequentemente, o stock de pneus usados sofreu

também um acréscimo considerável, principalmente nos países industrializados (Khorami *et al.*, 2007).

A deposição de pneus usados foi um problema no passado e continua a sê-lo devido à acumulação resultante (Jang *et al.*, 1997). A título de exemplo, nos Estados Unidos da América, a EPA em 1991 estimava que cerca de 2 bilhões de resíduos de pneus encontravam-se acumulados em stocks ou depósitos de pneus fora de controlo/ilegais em todo o país. Outros milhões estariam espalhados em barrancos, desertos, florestas e terrenos vazios. Em 1994 foram criados programas de gestão em vários estados, com o principal objectivo da prevenção e redução de depósitos ilegais de pneus. Em 2005, estimava-se que permaneciam ainda 188 milhões de pneus espalhados pelo país, uma melhoria comparada ao ano de 2004, onde existiam cerca de 275 milhões, e ao ano de 1994, onde se estimava uma quantidade entre 700 a 800 milhões de pneus depositados ilegalmente.

A maioria dos profissionais na área concorda que existe uma problemática associada a esta realidade, estando cinco faces deste problema listadas abaixo (EPA, 1991):

- Os pneus constituem terreno fértil para os mosquitos. Além do grande incómodo associado as suas picadas, os mosquitos são um agente transmissor de várias doenças.
- Locais onde a deposição de pneus é descontrolada são inestéticos e promovem sérios riscos de incêndio. Um pneu usado inteiro apresenta 75% de espaços vazios, o que dificulta a extinção do fogo com água ou corte de fornecimento de oxigénio (Jang *et al.*, 1997). A EPA (1991) refere que nas últimas décadas existiram incêndios em depósitos de pneus, que duraram alguns meses, criando grandes quantidades de fumo acre e deixando para trás um resíduo oleoso perigoso, contaminando águas e solos.
- Os pneus usados têm que possuir locais de deposição. Normalmente estes tendem a ser enviados para os locais ou fins que envolvem menos custos. Assim, os custos ou imposições legais podem levar a um aumento da deposição ilegal deste tipo de produto.
- A eliminação de resíduos de pneus é um processo com custos associados relativamente altos.
- A deposição de pneus usados inteiros em aterro, assim como os seus fragmentos não é permitida em diversos países.

Assim, para contrariar esta problemática, os pneus usados devem ser utilizados para minimizar o impacto ambiental e maximizar a conservação dos recursos naturais. Esta acção resulta na **valorização** de pneus usados, que tal como o DL 111/2001 refere, diz respeito a:

“Operações que visem a utilização de pneus usados para outros fins que não os iniciais, nomeadamente a reciclagem de pneus, a valorização energética, bem como a sua utilização em trabalhos de construção civil e obras públicas, a sua utilização como protecção de embarcações, molhes marítimos ou fluviais e no revestimento dos suportes de vias de circulação automóvel”.

### **2.3.1 Enquadramento legal**

---

Com a crescente consciência da necessidade de preservar o ambiente, evitando a perturbação causada pela deposição de resíduos e também evitando a extracção de matérias-primas, tornou-se evidente a necessidade de os governos criarem legislação a fim de serem controlados todos os aspectos do ciclo de vida dos bens, que levam ao esgotamento de recursos ou à deposição de resíduos.

A Europa tem vindo a produzir legislação revolucionária na abordagem desta problemática e tem, através de directivas de adaptação obrigatória, enriquecido a legislação nacional dos seus Estados-membros (Campos, 2006). O quadro 2.6 apresenta uma compilação dos documentos legais existentes, a nível europeu e nacional sobre resíduos, podendo estes ser gerais, ou especificamente relacionados com a temática dos pneus usados.



**Quadro 2.6:** Síntese da Legislação em vigor relacionada com a gestão de Pneus Usados.

	Europeia	Âmbito	Nacional
	Designação		Designação
Geral	Directiva 2008/98/CE	Directiva-Quadro de Resíduos	DL 178/2006
	Decisão 2000/532/CE	Lista Europeia dos Resíduos	Portaria 209/2004
	Directiva 1999/31/CE	Deposição de Resíduos em Aterro	DL 152/2002 DL 183/2009
	Directiva 2000/53/CE	Veículos em fim de vida (VFV)	DL 196/2003
	Directiva 2000/76/CE	Incineração de Resíduos	DL 85/2005
		Transporte de Resíduos	Portaria 335/97
Específica		Princípios e normas na Gestão de PU	DL 111/2001 DL 43/2004
		Pneus Recauchutados	DL 80/2002

### 2.3.1.1 Política e legislação europeia

Desde a publicação da primeira Directiva-Quadro (DQ) dos resíduos, **directiva 75/422/CEE**, a 15 de Julho de 1975, a União Europeia (UE) tem desenvolvido um conjunto de instrumentos regulamentares e económicos que pretendem a correcta gestão dos resíduos, tendo em vista a minimização dos seus impactes no ambiente e na saúde, assim como a conservação dos recursos naturais.

Nesta DQ, diversas orientações foram fornecidas aos Estados-Membros (EM), de forma a adoptarem medidas adequadas de promoção da prevenção, reciclagem e transformação de resíduos, bem como a obtenção a partir destes de matérias-primas e eventualmente de energia, assim como qualquer outro método que permita a reutilização dos resíduos (art. 3º), garantindo que a gestão dos resíduos se faz sem colocar em risco a saúde humana nem prejudicar o ambiente (art.4º). Ainda nesta directiva é defendido também o princípio do “poluidor-pagador” no artigo 11º onde se afirma, que de acordo com este princípio “ os custos de eliminação dos resíduos” devem ser suportados pelo detentor dos resíduos e/ou produtor”.

A 18 de Março de 1991 a anterior directiva foi alterada, implementando-se a **directiva do Conselho nº 91/156/CEE**. Neste novo documento, prevê-se a elaboração de uma lista de

resíduos (a actual Lista Europeia de Resíduos) e também é estabelecida uma hierarquia de opções para a gestão de resíduos, considerando em primeiro lugar a prevenção ou a redução da produção e da nocividade dos resíduos, e em segundo lugar o aproveitamento dos resíduos por reciclagem, reemprego, reutilização ou qualquer outra acção tendente à obtenção de matérias-primas secundárias; ou a utilização de resíduos como fonte de energia.

A directiva 75/439/CEE sofreu ainda algumas alterações em 2006 (Directiva 2006/12/CE) e foi revogada com a publicação da **Directiva 2008/98/CE** do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro de 2008, com efeitos a partir de 12 de Dezembro de 2010. Este novo documento legal, estabelece medidas de protecção do ambiente e da saúde humana, prevenindo ou reduzindo os impactos adversos decorrentes da geração e gestão de resíduos, diminuindo os impactos gerais da utilização dos recursos e melhorando a eficiência dessa utilização.

No que diz respeito a definições, importa destacar o que esta directiva considera como:

- *Resíduos*, quaisquer substâncias ou objectos de que o detentor se desfaz ou tem intenção ou obrigação de se desfazer;
- *Valorização*, qualquer operação cujo resultado principal seja a transformação dos resíduos de modo a servirem um fim útil, substituindo outros materiais que, caso contrário, teriam sido utilizados para um fim específico, ou a preparação dos resíduos para esse fim, na instalação ou no conjunto da economia;
- *Reciclagem*, qualquer operação de valorização através da qual os materiais constituintes dos resíduos são novamente transformados em produtos, materiais ou substâncias para o seu fim original ou para outros fins. Inclui o reprocessamento de materiais orgânicos, mas não inclui a valorização energética nem o reprocessamento em materiais que devam ser utilizados como combustível ou em operações de enchimento;
- *Reutilização*, qualquer operação mediante a qual produtos ou componentes que não sejam resíduos são utilizados novamente para o mesmo fim para que foram concebidos.

Esta nova DQ refere que a hierarquia dos resíduos é aplicável enquanto princípio geral da legislação e da política de prevenção e gestão de resíduos, devendo os EM respeitar a seguinte ordem de opções:

- a) Prevenção e redução;

- b) Preparação para a reutilização,
- c) Reciclagem;
- d) Outros tipos de valorização (e.g. valorização energética);
- e) Eliminação;

Ainda nesta nova DQ, no art. 8.º é reforçado o princípio da responsabilidade alargada do produtor, estipulando que os EM,

“ (...) Podem tomar medidas de carácter legislativo ou não legislativo para assegurar que uma pessoa singular ou colectiva que a título profissional desenvolva, fabrique, transforme, trate, venda ou importe produtos (o produtor do produto) esteja sujeita ao regime de responsabilidade alargada do produtor”.

As medidas referidas no presente artigo podem incluir a aceitação dos produtos devolvidos, a subsequente gestão de resíduos e a responsabilidade financeira por essas actividades, a obrigação de disponibilizar ao público informações acessíveis sobre até que ponto o produto é reutilizável e reciclável, bem como o incentivo à concepção mais ecológica dos produtos de modo a que tenham um menor impacte ambiental ao longo do seu ciclo de vida.

Acerca da responsabilidade pela gestão de resíduos, é referido no art. 15.º que os EM devem tomar:

“ (...) As medidas necessárias para assegurar que o produtor inicial dos resíduos ou outros detentores procedam eles próprios ao tratamento dos resíduos ou confiem esse tratamento a um comerciante ou a um estabelecimento ou empresa que execute operações de tratamento de resíduos, ou a um serviço de recolha de resíduos público ou privado (...)”.

De uma forma sintética, pode-se referir então que os eixos fundamentais da política europeia de gestão de resíduos são três: o princípio do poluidor-pagador, a hierarquia de opções para a gestão dos resíduos e o princípio da responsabilidade alargada do produtor. As legislações sobre responsabilidade ambiental têm tratado com maior rigor as questões ambientais, as quais, juntamente com as descobertas dos estudiosos da temática, estão a levar a uma nova dimensão da ética e da responsabilidade das empresas frente às questões ambientais (Braga de Carvalho, 2007).

Este assumir das responsabilidades ambientais, levou a que a gestão ambiental integrada adquirisse uma grande relevância. Os objectivos da gestão integrada aplicada aos PU devem contemplar os seguintes aspectos:

1. A prevenção da produção de resíduo por implementação de medidas que aumentem a vida útil dos pneus;
2. A recauchutagem como medida de reutilização;

3. A reciclagem material que, actualmente, consiste em triturar os pneus e fazer a separação dos materiais (borracha, têxteis e aço);
4. A valorização que, actualmente, em Portugal consiste na valorização energética numa cimenteira ou numa unidade de co-geração.

Ainda na Directiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro é introduzido um novo conceito, que consiste no fim de estatuto de resíduo. No ponto 1 do seu art.6.º, é referido que:

“ (...) determinados resíduos específicos deixam de ser resíduos (...) caso tenham sido submetidos a uma operação de valorização, incluindo a reciclagem, e satisfaçam critérios específicos a estabelecer nos termos das seguintes condições:

- a) A substância ou objecto ser habitualmente utilizada para fins específicos;
- b) Existir um mercado ou uma procura para essa substância ou objecto;
- c) A substância ou objecto satisfazer os requisitos técnicos para os fins específicos e o respeitar a legislação e as normas aplicáveis aos produtos; e
- d) A utilização da substância ou objecto não acarretar impactes globalmente adversos do ponto de vista ambiental ou da saúde humana.

Se necessário, os critérios incluem valores-limite para os poluentes e têm em conta eventuais efeitos ambientais adversos da substância ou objecto.”

No ponto 2 do mesmo artigo, é referido que deverão ser considerados critérios específicos para o estabelecimento do fim do estatuto de resíduo, nomeadamente pelo menos para agregados, papel, vidro, metal, pneus e têxteis. Esta medida visa assim, fomentar a produção de produtos que permitam reduzir o consumo de recursos naturais e a diminuição de resíduos para eliminação.

Para além da DQ dos resíduos, a União Europeia tem publicado um conjunto de outras directivas sobre instalações como aterros (**Directiva do Conselho 1999/31/CE**, de 26 de Abril) e incineradoras (**Directiva 2000/76/CE** do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de Dezembro) e sobre a gestão de determinados fluxos especiais de resíduos como óleos usados, pilhas e baterias, embalagens, VFV (**Directiva 2000/53/CE** do Parlamento Europeu e do Conselho, de 18 de Setembro) e equipamentos eléctricos e electrónicos. Porém, ainda não foi publicada nenhuma directiva específica para o fluxo dos PU.

No entanto, a **Directiva do Conselho 1999/31/CE**, de 26 de Abril, relativa à deposição de resíduos em aterros, estabelece na alínea 3 do art.5.º que os EM deverão tomar medidas para que não sejam aceites em aterros a partir de 2003 os pneus inteiros, com exclusão dos pneus utilizados como materiais de fabrico, e a partir de 2006 os PU triturados, excluindo em ambos os casos, os pneus de bicicletas e os pneus com diâmetro exterior superior a 1400 mm.

### 2.3.1.2 Política e legislação nacional

A directiva 75/422/CEE, de 15 de Julho, foi pela primeira vez transposta para direito interno pelo DL n.º488/85, de 25 de Novembro. Com a evolução do direito comunitário e as sucessivas alterações da Directiva 75/422/CEE, este DL foi revogado, primeiro pelo DL n.º 310/95, de 20 de Novembro, depois pelo DL n.º 239/97, de 9 de Setembro e, mais recentemente, pelo **DL n.º178/2006**, de 5 de Setembro, sendo este último o que estabelece o actual regime jurídico de gestão de resíduos.

Segundo o DL n.º 178/2006, de 5 de Setembro, também conhecido como Lei-Quadro dos Resíduos, resíduo é “qualquer substância ou objecto de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou obrigação de se desfazer, nomeadamente os identificados na Lista Europeia de Resíduos”. Este documento legislativo aplica-se às operações de gestão de resíduos, as quais compreendem toda e qualquer operação de recolha, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação de resíduos, bem como as operações de descontaminação de solos e a monitorização dos locais de deposição após o encerramento das respectivas instalações.

O princípio da hierarquia das operações de gestão de resíduos é mencionado no seu art.7.º, de acordo com o qual:

1. A gestão de resíduos deve assegurar que à utilização de um bem sucede uma nova utilização ou que, não sendo viável a sua reutilização, se procede à sua reciclagem ou ainda a outras formas de valorização;
2. A eliminação definitiva de resíduos, nomeadamente a sua deposição em aterro, constitui a última opção de gestão, justificando-se apenas quando seja técnica ou financeiramente inviável a prevenção, a reutilização, a reciclagem ou outras formas de valorização;
3. Os produtores de resíduos devem proceder à separação dos resíduos na origem de forma a promover a sua valorização por fluxos e fileiras;
4. Deve ser privilegiado o recurso às melhores tecnologias disponíveis com custos economicamente sustentáveis que permitam o prolongamento do ciclo de vida dos materiais através da sua reutilização, em conformidade com as estratégias complementares adoptadas noutros domínios.

Este diploma procura também dinamizar o processo de atribuição de licenças, clarificar as regras a que estas estão sujeitas, nomeadamente taxas e prazos, e abre igualmente a possibilidade de revisão destas licenças em função de evoluções tecnológicas cada vez mais rápidas.

Outra grande inovação é a revisão dos procedimentos de registo de resíduos, prevendo a possibilidade de utilização da Internet como ferramenta de comunicação, para substituição de preenchimento dos inúmeros procedimentos burocráticos de controlo em vigor, que traziam uma ineficiência e incerteza, além de um elevado custo burocrático às actividades de gestão de resíduos. Com esta nova ferramenta pretende-se também homogeneizar a informação recolhida e acelerar o seu tratamento.

Para o efeito criou-se o SIRER (Sistema Integrado de Registo Electrónico de Resíduos), actualmente alterado para a plataforma Sistema Integrado de Registo da Agência Portuguesa do Ambiente (SIRAPA). A obrigatoriedade de efectuar o registo permanece a cargo dos produtores e operadores de gestão de resíduos mas facilita-se o acesso e o tratamento dos dados introduzidos, bem como se facilita a disponibilização ao público em geral, de informação actualizada. De facto, o SIRAPA permite reunir a seguinte informação prestada pelos intervenientes na gestão de resíduos: (1) origens discriminadas dos resíduos; (2) quantidade, classificação e destino discriminados dos resíduos; (3) identificação das operações efectuadas; e (4) informação relativa ao acompanhamento efectuado, contendo os dados recolhidos através dos meios técnicos adequados (conforme o disposto no artigo 49º). Cria-se também, a partir deste documento, a Comissão de Acompanhamento de Gestão dos Resíduos (CAGER) com a obrigação de acompanhar a evolução do mercado de resíduos e incentivar o aproveitamento de resíduos e a adopção das melhores tecnologias disponíveis, MTDs.

O DL n.º 178/2006, de 5 de Setembro, é assim o documento legislativo que estabelece os princípios gerais da gestão de resíduos, o planeamento, as normas técnicas e licenciamento das operações de gestão, o SIRER e o regime económico e financeiro da gestão de resíduos, aplicável a todos os tipos de resíduos, incluindo os PU.

A Directiva do Conselho 1999/31/CE, de 26 de Abril, relativa à deposição de resíduos em aterro, e que interdita a deposição de PU nos aterros, foi transposta para o direito interno português pelo **DL n.º152/2002**, de 23 de Maio. Na alínea d) do art.6.º deste DL é referido que não podem ser depositados em aterro PU, com excepção dos pneus utilizados como elementos de protecção num aterro, pneus de bicicletas e pneus que possuam um diâmetro exterior superior a 1400 mm.

Encontrando-se interdita a deposição dos PU em aterros, Portugal teve que desenvolver um instrumento regulamentar específico para a gestão deste fluxo de resíduos, o **DL n.º 111/2001**. Nos termos deste documento, a responsabilidade da gestão dos pneus usados, terá obrigatoriamente de ser delegada a uma entidade gestora sem fins lucrativos, devidamente licenciada para o efeito.

O DL n.º 111/2001 definiu objectivos quantitativos para reutilização, reciclagem e valorização. Assim, foi definido que o sistema de gestão é responsável por conseguir que, até Janeiro de 2007, sejam:

- a) Recolhidos e correctamente encaminhados pelo menos 95% dos pneus usados gerados anualmente, conforme correcção introduzida pelo DL n.º 43/2004;
- b) Recauchutados pelo menos 30% dos pneus usados gerados anualmente, conforme correcção introduzida pelo mesmo decreto-lei;
- c) Valorizados todos os pneus recolhidos e não recauchutados, e que no mínimo, 65% destes sejam sujeitos a reciclagem material, sendo que os restantes podem ser sujeitos a valorização energética.

No âmbito do sistema de gestão de pneus e pneus usados, que actualmente em Portugal é gerido pela sociedade Valorpneu, a responsabilidade do produtor termina quando o pneu é:

- a) Confiado a uma entidade licenciada para a sua recauchutagem;
- b) Confiado a uma entidade para a sua reciclagem (trituração), não havendo assunção de responsabilidade posterior relativamente ao destino a dar aos materiais triturados,
- c) Confiado a uma entidade licenciada para a sua incineração para recuperação energética, não havendo assunção posterior relativamente às cinzas e gases gerados, e ainda;
- d) Confiado a uma entidade que promova a valorização em construção civil e obras públicas;

A partir daqui, a responsabilidade é dos operadores de resíduos que terão de estar devidamente licenciados para a actividade. Para utilização em construção civil, não se considera que o valorizador seja um operador de resíduos e, por isso, não carece de licença específica. No entanto, caso a utilização prevista cesse, também não fica atribuída responsabilidade pelo seu correcto reencaminhamento para o sistema de gestão.

Este diploma legal é alterado nos artigos 4º, 9º e 17º pelo **DL n.º 43/2004**, de 2 de Março. De forma resumida, as principais alterações prendem-se com:

- O período de vida útil de um pneu, que passa a estar definido como quatro anos, em condições normais;
- Clarificação do cálculo dos objectivos de gestão (indexando os objectivos de recolha e de recauchutagem ao número de pneus usados efectivamente gerados no país, em vez de considerar os pneus anualmente colocados no mercado, como constava anteriormente);

- Introdução da obrigatoriedade do valor de contrapartida financeira (“Ecovalor”) nas regras de comercialização, levando a que este seja discriminado na factura de venda; e
- Esclarecimento em relação às regras de escolha de pneus usados, clarificando que cabe aos distribuidores receberem gratuitamente os pneus usados aquando da venda de pneus novos.

A Lista Europeia de Resíduos (LER) consta na **Portaria n.º 209/2004**, de 3 de Março, que assegura a harmonização do normativo vigente em matéria de identificação e classificação de resíduos, tendo ainda previsto facilitar um perfeito conhecimento pelos agentes económicos do regime jurídico a que estão sujeitos. Segundo esta lista, os PU são genericamente classificados como resíduos não perigosos, podendo também fazer parte do fluxo de VFV, caso não sejam previamente retirados destes. É também atribuído um outro código aos resíduos de pneus que sofrem algum tratamento mecânico (e.g triagem, trituração, compactação).

O transporte de resíduos só pode ser efectuado mediante a utilização de uma Guia de Acompanhamento de Resíduos (GAR), de acordo com a **Portaria n.º 335/97**, de 16 de Maio. Esta fixa as regras a que fica sujeito o transporte de resíduos em território nacional. O artigo 6º do presente documento legal, define a GAR Modelo A de aplicação universal, exceptuando para o modelo B o transporte de Resíduos Hospitalares Perigosos, e o Guia de Acompanhamento de Resíduos de Construção e de Demolição, aprovada pela Portaria n.º 471/2008, de 11 de Junho.

O **DL n.º 183/2009**, de 10 de Agosto transpõe para a ordem jurídica interna a Directiva n.º 1999/31/CE, de 26 de Abril, relativa à deposição de aterros. Este Decreto estabelece o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e os requisitos gerais a observar na concepção, construção, exploração, encerramento e pós-encerramento de aterros, incluindo as características técnicas específicas para cada classe de aterros. Os objectivos gerais deste diploma dizem respeito ao evitar e reduzir os efeitos negativos sobre o ambiente da deposição dos resíduos em aterro à escala local, em especial a poluição das águas superficiais e subterrâneas, do solo e da atmosfera, e também à escala global, em particular o efeito de estufa, bem como quaisquer riscos para a saúde humana. O presente documento mantém a proibição da deposição de pneus usados em aterros, com excepção dos pneus utilizados como elementos de protecção e dos pneus que tenham diâmetro exterior superior a 1400 mm.

O **DL n.º 196/2003**, de 23 de Agosto estabelece o regime jurídico a que fica sujeita a gestão de veículos e de VFV transpondo para o ordenamento jurídico interno a Directiva n.º 2000/53/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 18 de Setembro, tendo como objectivo principal a prevenção da produção de resíduos provenientes de veículos e a



promoção da reutilização, da reciclagem e de outras formas de valorização de VFV. Como objectivos secundários, o diploma comunitário estabeleceu a quantidade de resíduos a eliminar e a melhoria do desempenho ambiental de todos os operadores intervenientes durante o ciclo de vida dos veículos, sobretudo daqueles directamente envolvidos em operações de tratamento de VFV.

Finalmente, o **DL nº. 80/2002**, de 4 de Abril designa como entidade competente para a concessão da homologação do fabrico de pneus recauchutados de automóveis de mercadorias, passageiros e respectivos reboques em território nacional, a Direcção-Geral de Viação. No mesmo diploma são definidas as infracções e respectivas sanções para a produção ou utilização de pneus recauchutados que não obedeam às prescrições constantes dos regulamentos existentes (Regulamento n.º 108, aprovado pelo Decreto nº 9/2002 para os pneus recauchutados de veículos ligeiros de passageiros ou seus reboques, e Regulamento n.º 109, aprovado pelo Decreto nº10/2002 para pneus recauchutados de veículos de mercadorias, pesados de passageiros ou respectivos reboques).

### **2.3.2 Reutilização, Recauchutagem, Reciclagem e Valorização Energética de Pneus Usados**

---

Para Jang *et al.* (1997), uma das práticas existentes para a resolução da problemática associada aos pneus usados, é a própria redução da existência deste tipo de material. Assim, o tipo de material utilizado no fabrico de pneus usados, assim como o seu design devem estar associados a uma melhor prestação e longevidade da utilização do produto final.

De acordo com a OECD (2006) existem quatro opções possíveis de valorização de pneus usados, contribuindo estas para a colocação deste tipo de material em circuitos económicos. As opções gerais correspondem à reutilização, recauchutagem, reciclagem e valorização energética.

Entende-se por **Reutilização** o aproveitamento do pneu, que ainda se encontra em condições, sendo de novo colocado no mercado para continuar a ser utilizado para o mesmo fim (reutilização meio-piso), ou aproveitamento do pneu, sem necessidade de qualquer pré-processamento, para utilização em fim diverso do qual foi concebido (reutilização para outros fins) (Valorpneu, 2010c).

Jang *et al.* (1997) referem a possibilidade da utilização de pneus semi-novos, oriundos de veículos em fim de vida, ou resultantes da substituição prematura de pneus usados, devido

às práticas comuns de substituição (quando um pneu se encontra danificado, procede-se à substituição de dois, ou até dos quatro pneus do veículo).

A **Recauchutagem** corresponde ao processo de transformação de pneus usados, designados por carcaças, que não apresentem danos estruturais, em pneus capazes de serem reutilizados, através da deposição de um novo piso (Valorpneu, 2010c). Existem duas tecnologias que permitem a produção de pneus recauchutados:

- Cura a frio ou pré-moldados: o novo piso que será aplicado é pré-vulcanizado à sua forma final. Trata-se de um processo flexível, indicado para produzir pequenas séries de vários tamanhos e modelos. Aplica-se a pneus de camiões e veículos ligeiros de passageiros (ERTMA, 2010).
- Cura a quente ou moldável: o pneu é totalmente raspado colocando a descoberto toda a sua estrutura primitiva. De seguida, o pneu é colocado num molde quente, onde se procede à configuração do piso, segundo as características de origem (Amaral *et al.*, 2000). Aplica-se à produção de grandes volumes, devido ao alto investimento e custos associados (ERTMA, 2010).

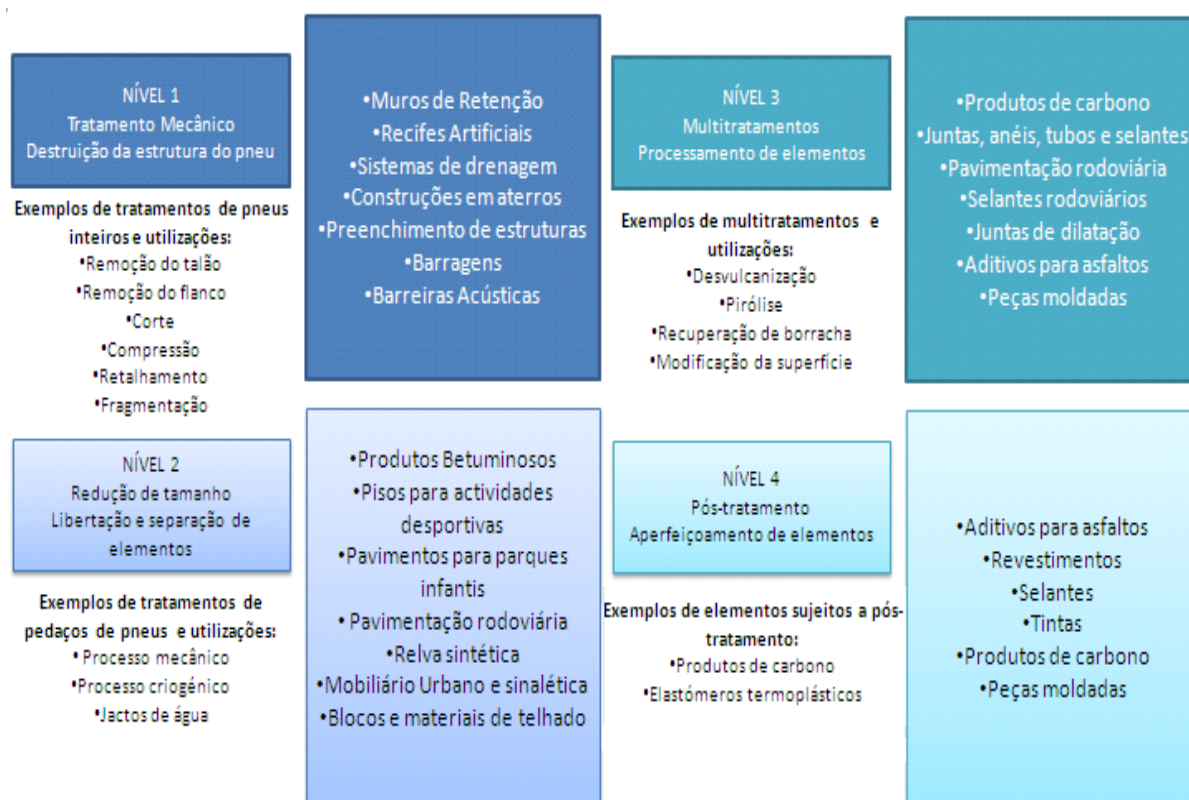
Segundo a Valorpneu (2010c), a **Reciclagem** corresponde ao processamento de pneus usados para qualquer fim, que não o inicial, nomeadamente como matéria-prima a incorporar noutros produtos. Os pneus são submetidos a diferentes processos, com o objectivo de separar e extrair diferentes componentes do pneu nomeadamente têxtil, aço e borracha de diferentes granulometrias.

A **Valorização Energética** de pneus usados diz respeito à sua utilização como combustível complementar ou alternativo para o fabrico de cimento ou para a produção de electricidade e vapor em unidades de co-geração. Os pneus usados possuem um elevado poder calorífico, o qual ronda os 5700 kcal/kg, sendo ligeiramente inferior ao do carvão, 6800 kcal/kg (Valorpneu, 2010c).

A Valorpneu (2010c) refere também que a utilização de pneus usados como combustível alternativo permite ainda a redução de emissões por combustão da biomassa, face à utilização de combustíveis fósseis, devido à componente de borracha natural existente nos pneus.

### 2.3.3 Pneus usados: Tipos de materiais produzidos e aplicações

Da reciclagem de pneus usados, resulta uma quantidade diversa de produtos derivados de pneus usados, que podem ser utilizados em diversas aplicações. A figura 2.8 apresenta resumidamente os níveis de tratamento de pneus usados e os respectivos produtos resultantes.



**Figura 2.8:** Níveis de tratamento de pneus usados e produtos resultantes (adaptado de Shulman, 2004).

Assim, os produtos resultantes da valorização de pneus dos diversos níveis de tratamento, e as suas aplicações são as seguintes:

- **Pneus inteiros:** Podem ser utilizados sem qualquer tratamento ou tratados por processos mecânicos para os tornar mais flexíveis ou manobráveis. Encontram-se aplicações essencialmente em projectos de engenharia civil como recifes artificiais, blocos de construção, construção de taludes, barreiras de protecção sonora, estabilização de terrenos ou como fonte de matéria-prima para processamento posterior (figuras 2.9 e 2.10) (Shulman, 2004).



**Figuras 2.9 (A) e 2.10 (B):** Exemplos de aplicações de pneus inteiros (WBCSD, 2008b).

- **Fragmentos (“*shred tires*”):** Resultantes de tratamento mecânico para fragmentação, rasgamento, ou corte em pedaços irregulares de aproximadamente 50 a 300mm em qualquer dimensão (Shulman, 2004). Segundo Shulman (2004), as utilizações mais significativas são enchimentos leves, drenagem, isolamento térmico para estradas e edifícios, barreiras de isolamento sonoro, construção de aterros sanitários, e matéria-prima para processamento posterior (figuras 2.11 e 2.12).
- **Chips:** Produzidos a partir dos fragmentos ou directamente dos pneus inteiros, são pedaços mais pequenos. O tamanho dos pedaços de pneus produzidos pode variar entre 300-160 mm de comprimento por 100-230 mm de largura, até valores como 100-150 mm de comprimento, dependendo do fabricante, modelo e condições de corte (Kassim *et al.*, 2005). Encontram-se no mercado como enchimentos leves para construção, drenagem, manutenção de aterros sanitários, fundações de pontes, estradas ou campos desportivos, tratamento de solos e matéria-prima para processamento posterior (Shulman, 2004).



**Figuras 2.11 e 2.12:** Aplicação de chips de pneus numa fossa séptica (Grimes *et al.*, 2003) e aplicação de fragmentos de pneus na construção de uma via rodoviária (EPA, 2008).

- **Granulado:** É o resultado da moagem de chips para obtenção de partículas finamente divididas, com dimensões de 1 a 10mm. Actualmente existem dois

métodos principais de redução de tamanho em uso: a Granulagem a temperatura ambiente, processo mecânico realizado à temperatura ambiente ou ligeiramente acima, que corta a borracha para a reduzir até uma distribuição de tamanhos pretendida, resultando em reciclado com grânulos de formas muito irregulares, ou a granulagem criogénica, que consiste num arrefecimento da borracha até fragilização recorrendo a refrigerantes, normalmente o azoto líquido, procedendo à sua trituração em moinhos de martelos até obter uma distribuição de tamanhos desejada, resultando em partículas de superfícies muito mais regulares que no processo anterior. Segundo Shulman (2004) têm ainda sido estudados processos químicos, biológicos, por microondas, por choque magnético e por água a alta pressão mas ainda sem sucesso comercial. As principais utilizações são: relvados artificiais; peças de automóveis; barreiras de impacto e de ruído; superfícies para pavimentos; pisos para parques infantis e recintos desportivos; calçado; correctivos de solo; rodas maciças de borracha; equipamentos e mobiliário de controlo de tráfego urbano; BMB – betume modificado com borracha; tapetes de descanso ou para utilizações desportivas; tapetes antivibrantes, de descanso e para gado; matéria-prima para processamentos posteriores (figuras 2.13 e 2.14) (Shulman, 2004; Recipneu, 2010a).



**Figuras 2.13 (A) e 2.14 (B):** Exemplos de aplicações de granulados de pneus (WBCSD, 2008b).

- **Pós:** São resultantes do processamento de borracha, para obter partículas finamente dispersas com dimensão inferior a 1mm, por moagem a temperatura ambiente, criogénica ou por tratamentos especiais como, por exemplo: pirólise; regeneração e reversão (Kassim *et al.*, 2005). Encontram aplicações em peças de automóveis, revestimentos para cablagem, cargas para pneus, calçado, ligantes para betumes porosos, vedantes, equipamentos desportivos, revestimentos e matéria-prima para processamentos posteriores (Shulman, 2004).
- **Pós muito finos:** São resultantes de uma gama de tratamentos muito especializados que melhoram ou introduzem propriedades particulares ao material.

As utilizações mais comuns são peças para automóveis, materiais de carbono, revestimentos e vedantes, ingredientes para pneus, materiais revertidos, e pigmentos e corantes para tintas (Shulman, 2004).

### 2.3.4 Aplicações de chips de pneus usados em sistemas de drenagem de Aterros Sanitários

---

A viabilidade da aplicação de chips de pneus usados em aterros sanitários deve ser dada, baseando-se na demonstração de que o seu desempenho é semelhante ou melhor que os materiais normalmente utilizados, tais como a brita, o areão ou o cascalho (HDR Engineering, 1997).

Os chips de pneus são bastante utilizados em obras de engenharia civil/ geotécnica devido principalmente às suas características de flexibilidade, força e resistência fraccional (Edeskar, 2004; UNEP, 2008). Este tipo de material possui outras vantagens como a sua elevada durabilidade e não serem biodegradáveis (Yoon *et al.*, 2005). Os chips de pneus usados apresentam ainda uma baixa condutividade térmica, uma boa condutividade hidráulica e compressibilidade (Humphrey e Katz, 2001; Barkerlemer Engineering Consultants, 2005). O quadro 2.7 apresenta algumas propriedades físicas dos chips de pneus usados.

**Quadro 2.7:** Propriedades físicas dos fragmentos de pneus (adaptado de Salgado *et al.*, 2003; SDAB, 2007; GeoSyntec Consultants, 2008).

Parâmetro	Valor Comum
Densidade Volúmica ( $\rho$ )	0,45-0,90 t/m <sup>3</sup>
Densidade Compacta ( $\rho_s$ )	1,15 t/m <sup>3</sup>
Porosidade ( $n$ )	40%
Permeabilidade ( $k$ )	0,75-2,0 cm/s
Coefficiente de Rigidez ( $E$ )	0,18- 1,6 Mpa
Ângulo de fricção ( $\phi^\circ$ )	25-45°
Coefficiente de Condutividade Térmica ( $\lambda$ )	0,20 W/mK
Capacidade de absorção da água	2-4%

Comparativamente aos materiais minerais drenantes, Humphrey (2005) refere que os fragmentos de pneus são cerca de um terço mais leves que este tipo de material. Cabeças e Dore (2008) referem também, que os chips de pneus usados possuem uma

compressibilidade bastante superior, quando comparada à dos materiais utilizados recorrentemente em obras geotécnicas, como o areão, seixo ou cascalho.

Roque e Cabeças (2009) referem que os fragmentos de pneus possuem uma porosidade relativamente elevada quando comparada com a dos solos, o que lhes fornece uma elevada capilaridade e uma boa capacidade de drenagem, sendo esta quase 10 vezes superior à de materiais drenantes (Humphrey, 2005; SDAB, 2007).

Os valores de permeabilidade são semelhantes aos que apresentam os materiais inertes, sendo mais baixos quando os fragmentos de pneus estão expostos a elevados níveis de compressão (HDR Engineering, 1997; SDAB, 2007). Relativamente à capacidade de absorção da água, os chips de pneus usados apresentam valores de cerca de 2 a 4%, valores semelhantes aos dos agregados naturais (GeoSyntec Consultants, 2008). Segundo Humphrey e Katz (2001) os fragmentos de pneus apresentam também uma condutividade térmica reduzida.

Um aterro constitui uma “instalação de eliminação para deposição de resíduos acima ou abaixo da superfície natural (isto é, deposição subterrânea), incluindo-se as instalações de eliminação internas (isto é, os aterros onde o produtor de resíduos afecta a sua própria eliminação de resíduos no local de produção) e uma instalação permanente (isto é, por um período superior a um ano) usada para armazenagem temporária” (DL n.º 152/2002). O seu correcto dimensionamento tem em consideração diversos factores tais como: (1) o horizonte temporal do projecto; (2) tipologia dos resíduos a receber em aterro; (3) estudo demográfico; (4) produção de resíduos; (5) volume de resíduos a depositar; (6) determinação da área necessária para o aterro; (7) levantamento topográfico, e (8) prospecção geológica, geohidrológica e geotécnica (Levy e Cabeças, 2006).

Segundo o DL n.º 183/2009, de 10 de Agosto, é possível diferenciar os aterros em três classes distintas: (1) aterro para deposição de resíduos inertes; (2) aterro para deposição de resíduos não perigosos; e (3) aterro para deposição de resíduos perigosos. Os requisitos técnicos variam consoante a classe do aterro, estando estabelecidos quanto à localização, controlo de emissões e protecção do solo e águas, estabilidade, equipamentos, instalações e infra-estruturas de apoio e ainda condições de encerramento e integração paisagística.

Segundo Levy e Cabeças (2006) um aterro pode ser considerado como um reactor bioquímico em que os resíduos e a água pluvial são as principais entradas, sendo os lixiviados e o biogás os principais efluentes produzidos. De acordo com as exigências legislativas, um aterro de resíduos tem de contemplar um sistema de impermeabilização, constituído por uma barreira passiva e uma barreira activa, constituindo o isolamento estanque na interface com os terrenos em que está implantado e cuja função é confinar internamente os resíduos e todos os efluentes residuais líquidos (águas lixiviantes) e

gasosos (biogás), impedindo a sua migração para o exterior; o sistema de impermeabilização a desenvolver no aterro sanitário estende-se pela zona basal e taludes, abrangendo toda a geometria do terreno destinada à área de deposição de resíduos.

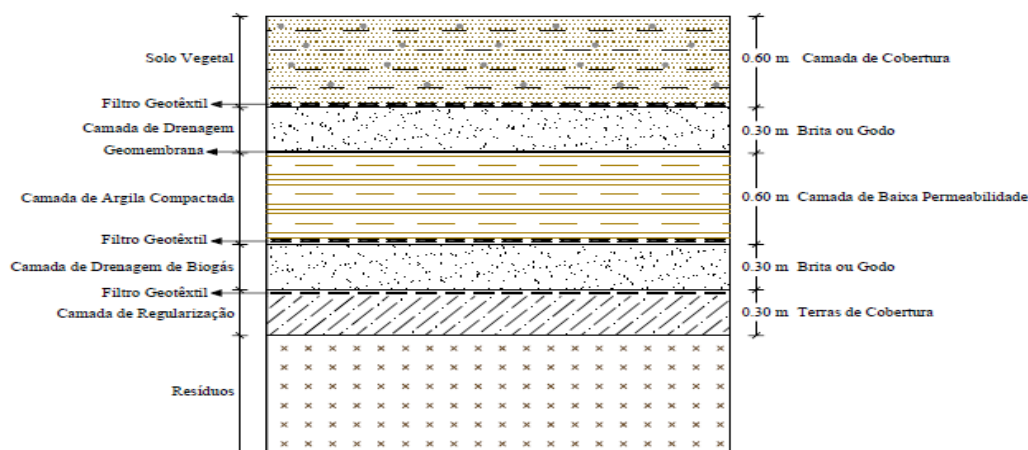
A aplicação de materiais resultantes de pneus usados, pode ser efectuada em diversas estruturas constituintes de um aterro sanitário e com diversos fins nomeadamente: (a) Utilização de chips de pneus usados para colectores de lixiviados; (b) Camadas de colectores de biogás; (c) Pavimentos rodoviários do aterro e (d) Cobertura diária do aterro (Barkerlema Engineering Consultants, 2005).

Dando especial atenção à possibilidade da aplicação de chips de pneus usados em sistemas de cobertura final e em sistemas de drenagem, destacam-se alguns requisitos técnicos de um aterro, relacionados com estas duas estruturas.

Ao atingir a sua capacidade máxima, o sistema de cobertura final constitui uma peça fundamental no processo de encerramento de um aterro. Esta cobertura tem como principais funções: (a) a minimização do escoamento superficial; (b) o controlo da infiltração de água nos resíduos, minimizando a produção de lixiviados (Melchior *et al.*, 1993) (c) o impedimento da migração de lixiviados através dos taludes laterais (Russo, 2005); (d) a protecção dos resíduos, de forma a evitar o contacto directo com pessoas e animais (Russo, 2005); (e) o controlo da emissão de gases (Levy e Cabeças, 2006); (f) a minimização da possibilidade de ocorrência de incêndios (Williams, 2005); (g) redução da entrada de ar que pode perturbar o processo anaeróbio de degradação (Williams, 2005; Levy e Cabeças, 2006) e (f) fornecer condições para o crescimento de vegetação (Hoeks e Ryhiner, 1989 *in* Russo, 2005).

Da estrutura que o sistema de impermeabilização da cobertura final de um aterro (figura 2.15) deve possuir, realça-se a existência de uma camada drenante com 0,50 metros de espessura e  $K = 10^{-4}$  m/s. A função principal desta camada consiste em minimizar a carga hidráulica no interior do aterro, dado que permite a drenagem lateral da água infiltrada pelo topo (Williams, 2005; Levy e Cabeças 2006). Esta camada é geralmente constituída por material natural drenante, permitindo assim o escoamento e percolação das águas precipitadas para o sistema de drenagem implantado (Cabeças e Dores, 2008). Assim, devido às propriedades dos chips já expostas e tendo como principal vantagem associada a poupança de um recurso natural e a valorização de um produto reciclado, os chips de pneus usados apresentam-se como um substituto adequado na camada drenante de aterros.





**Figura 2.15:** Esquema de uma secção da cobertura final de um aterro (Russo, 2005).

É ainda importante referir que a restrição de deposição de resíduos de pneus em aterros, implementada pelo DL nº 152/2002 de 23 de Maio, e DL nº 183/2009 de 10 de Agosto não se aplica a chips de pneus, pois este material resulta do processamento de pneus usados, tendo como objectivo a sua valorização como produto. Assim, segundo Cabeças e Dores (2008) este material assume uma função protectora na produção de águas lixiviantes, na emissão de gases poluente e na integração paisagística.

### 2.3.5 Gestão de pneus usados em Portugal

O DL n.º 178/2006 encaminha a gestão de resíduos de pneus para diploma específico. Assim, o diploma que regula a Gestão de Resíduos de PU é actualmente, o DL n.º 111/2001 de 6 de Abril, com as correcções introduzidas pelo DL n.º 43/2004 de 2 de Março.

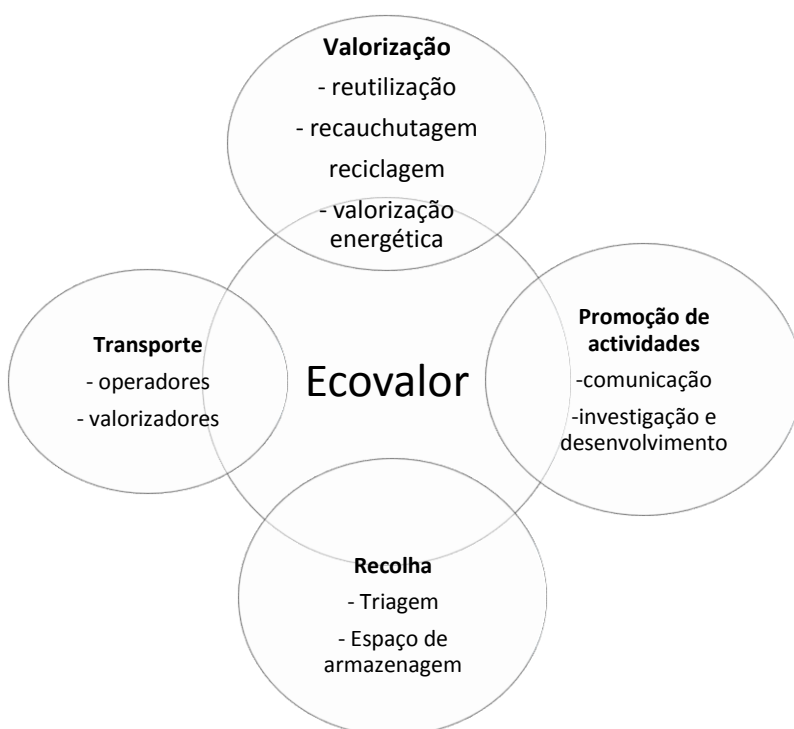
Na sequência deste DL, os produtores devem submeter a gestão de pneus usados a um sistema integrado, isto é, a responsabilidade dos produtores pela gestão de PU deve ser transferida para uma entidade gestora do sistema integrada, devidamente licenciada para o efeito. Esta entidade não deve possuir fins lucrativos, e na sua composição poderão figurar, além dos produtores, os distribuidores, recauchutadores, recicladores e valorizadores.

Assim, para satisfazer os requisitos acima enumerados, foi criada pelas empresas responsáveis pela gestão de pneus usados, a sociedade Valorpneu - Sociedade de Gestão de Pneus Lda, em 27 de Fevereiro de 2002. O seu principal objectivo é o de organizar e gerir o sistema de recolha e destino final de pneus usados (Valorpneu, 2010d).

A Valorpneu é uma sociedade por quotas, constituída pela ACAP – Associação do Comércio Automóvel de Portugal, pela ANIRP – Associação Nacional dos Industriais de Recauchutagem de Pneus e pela APIB – Associação Portuguesa dos Industriais de Borracha. A primeira possui 60% das quotas, enquanto que as últimas duas empresas, dividem igualmente as restantes quotas (Valorpneu, 2010d).

Segundo a Valorpneu, “o Sistema de Gestão de Pneus Usados define-se como sendo um sistema articulado de processos e responsabilidades que visa o correcto encaminhamento dos pneus em fim de vida, eliminando a deposição em aterro e promovendo a recolha, separação, retoma e valorização”.

O Sistema de Gestão de Pneus Usados (SGPU) utilizado em território nacional, funciona com base no Ecovalor, que consiste numa prestação financeira que varia mediante a categoria do pneu. Esta prestação é reflectida na cadeia de comercialização até ao cliente final aquando da venda dos pneus ou dos veículos/equipamentos que os contenham, devendo os produtores e distribuidores discriminar na respectiva factura, o valor correspondente (Valorpneu, 2010d). As receitas geradas financiam o sistema da Valorpneu, renumerando a prestação do seu serviço, financiando as campanhas de comunicação e actividades de investigação e desenvolvimento, tal como se encontra representado na figura 2.16.

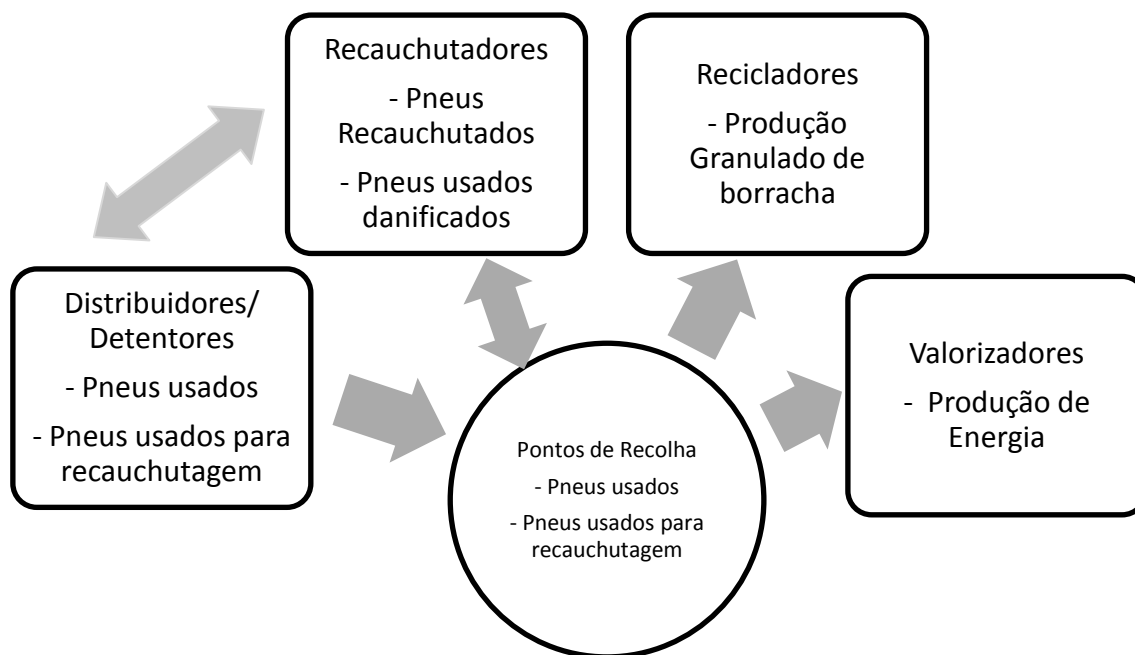


**Figura 2.16:** Aplicações do Ecovalor do SGPU (adaptado de Valorpneu, 2010d).

Os pneus abrangidos pelo SGPU são todos os pneus comercializados a nível nacional, iniciando-se o processo com a inserção de pneus novos ou usados no mercado nacional. Qualquer empresa que importe pneus é obrigada a realizar um contrato com a Valorpneu, onde se factura o Ecovalor respectivo dos pneus importados. Cada pneu introduzido no mercado nacional deve pagar uma única vez o seu Ecovalor associado.

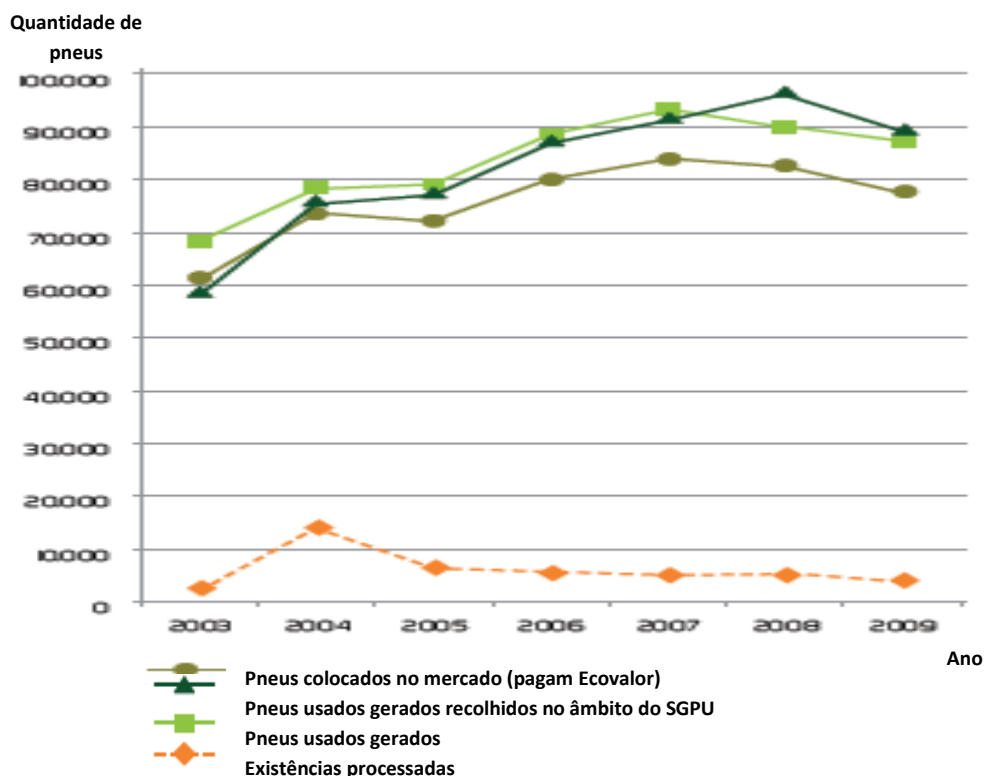
O modelo de funcionamento do SGPU encontra-se representado na figura 2.17, podendo traduzir-se o circuito de pneus usados nos seguintes passos (Campos, 2006; Brito, 2009; Valorpneu 2010d):

1. Quando os PU chegam aos distribuidores/detentores (oficinas, estações de serviço, lojas especializadas, desmanteladores, grandes frotistas, autarquias, particulares, etc.) Estes poderão entregá-los nos pontos de recolha, livres de encargos. Caso assim o entendam, podem também cedê-los aos recauchutadores. Salienta-se que os distribuidores de pneus não podem recusar a aceitação de PU contra a venda de pneus do mesmo tipo e na mesma quantidade.
2. Os recauchutadores podem também colocar nos pontos de recolha os PU resultantes da triagem de carcaças para recauchutar, sem qualquer custo associado, assim como podem também adquirir carcaças para recauchutar.
3. Os pontos de recolha constituem locais devidamente autorizados ou licenciados, para armazenamento temporário de qualquer tipo de pneus usados, funcionando como reservatório a montante dos operadores do SGPU. Estas estruturas permitem controlar e quantificar todos os fluxos de pneus usados encaminhados para os destinos existentes, assim como disponibilizam uma rede de recolha adequada e distribuída pelo país.
4. A distribuição, desde os pontos de recolha até aos vários operadores de pneus usados acreditados no sistema (recauchutadores, recicladores e valorizadores), é controlada e suportada financeiramente pelos fundos do SGPU.
5. Os recicladores e valorizadores energéticos fecham o ciclo do SGPU, recebendo os pneus em fim de vida, mediante uma contrapartida financeira e de acordo com as metas legais estabelecidas, dando-lhes o destino adequado: granulado de borracha, no caso dos recicladores; e energia, através dos valorizadores energéticos.



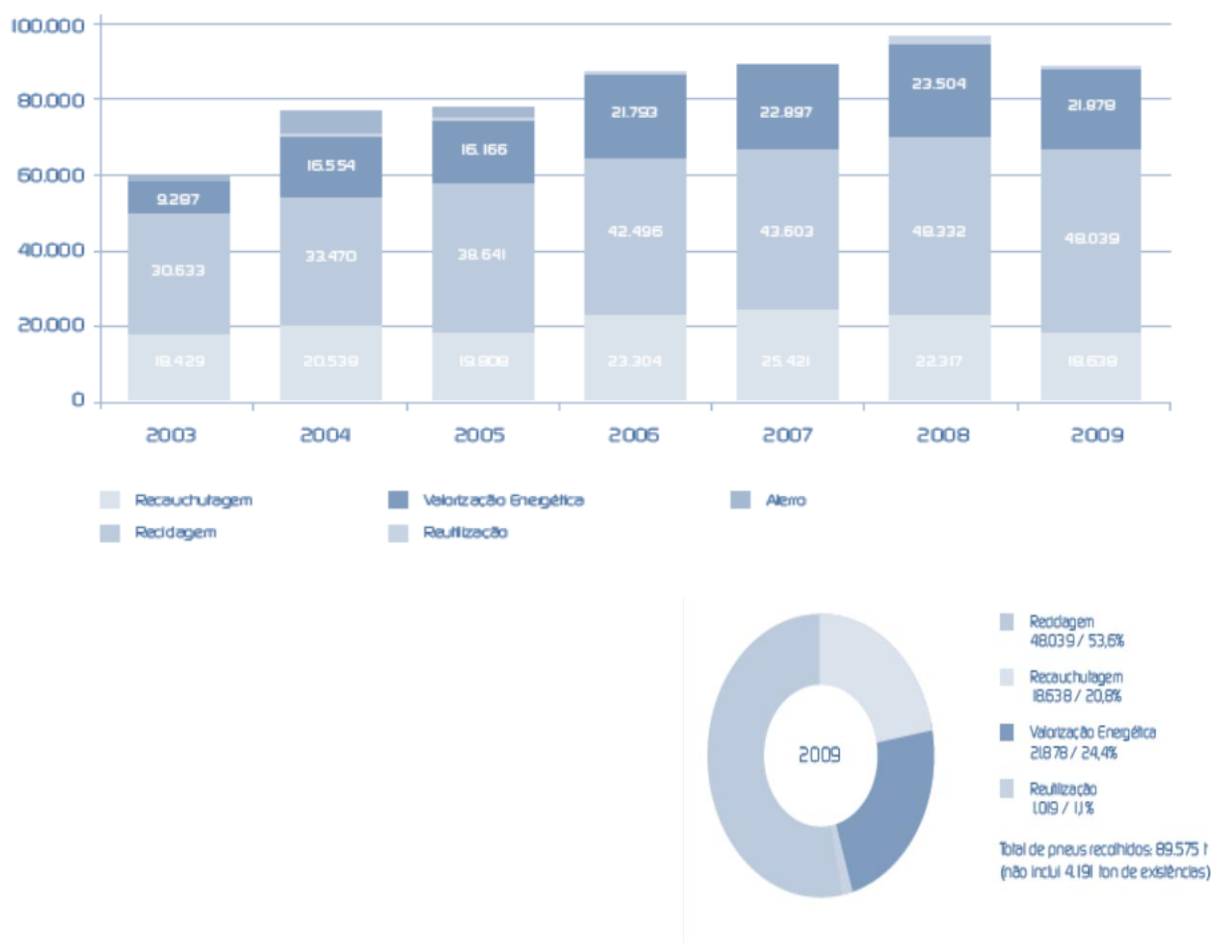
**Figura 2.17:** Modelo operacional do SGPU da Valorpneu (adaptado de Valorpneu, 2010d).

Segundo a Valorpneu (2010a), em 2009, foram colocados no mercado 78.349 toneladas de pneus novos, tendo-se gerado 86.959 toneladas de pneus usados. A diferença observada diz respeito em grande parte aos pneus recauchutados, que são reutilizados várias vezes ao longo do seu ciclo de vida, gerando consequentemente várias vezes um pneu usado. Verificou-se também que o mercado acentuou a tendência de descida já ocorrida no final de 2008, sendo que a recolha de pneus usados no âmbito do SGPU ressentiu-se desse facto e, pela primeira vez desde a constituição da Valorpneu, a quantidade de PU gerados recolhidos diminuiu face ao ano anterior, continuando, no entanto, a ser maior do que a quantidade de PU gerados. Tal significa que, apesar do aumento significativo de Produtores, ainda existe uma parcela de pneus oriundos do mercado paralelo (Valorpneu, 2010a). A figura 2.18 ilustra a evolução dos pneus colocados no mercado, gerados, recolhidos e existentes no período de 2003 a 2009.



**Figura 2.18:** Evolução dos pneus colocados no mercado, gerados, recolhidos e existentes no período de 2003 a 2009 (Valorpneu, 2010a).

A tendência de descida quer dos pneus colocados no mercado, quer dos PU gerados, devido à forte recessão económica, levou a que em 2009, a quantidade de pneus usados processados pelo SGPU tivesse diminuído face ao ano anterior, tendo ficado nas 93.766 toneladas, um valor semelhante ao verificado em 2006. A nível da desagregação dos destinos de valorização, de realçar a forte queda da recauchutagem, provavelmente devido à conjuntura económica já referida. De facto, o mercado condiciona fortemente a produção, nomeadamente de pneus recauchutados, e a sua comercialização (Valorpneu, 2010a). A reciclagem manteve-se ao nível do ano de 2008, como se pode verificar na figura 2.19.



**Figura 2.19:** Destino dos pneus usados gerados recolhidos no âmbito do SGPU (toneladas) de 2003 a 2009, com maior detalhe para o ano de 2009 (Valorpneu, 2010a).

Uma vez que a Valorpneu continua a contar com a adesão da totalidade do universo de empresas recauchutadoras em Portugal, o valor apresentado significa um decréscimo relativamente acentuado da quantidade de pneus recauchutados a nível nacional, face ao ano transacto. Este decréscimo, para além de traduzir a conjuntura económica desfavorável que se fez sentir também ao nível da venda de pneus recauchutados, reside no facto de em 2009, uma das maiores empresas nacionais ter aberto processo de insolvência (Valorpneu, 2010a). Realça-se ainda o facto de mais de metade da quantidade de pneus gerados ter sido encaminhada para reciclagem (53,6%), sendo este o destino preferido para a valorização de PU.



## **CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO**

---





## Capítulo 3 – Descrição dos casos de estudo

---

### 3.1 Utilização de chips de pneus usados MADRE ® – Recipneu

---

A Recipneu – Empresa Nacional de Reciclagem de Pneus, Lda encontra-se localizada no parque industrial de Sines, sendo uma das três recicladoras nacionais de PU (figura 3.1). É produtora de polímeros reciclados, ou granulados de borracha, desde o princípio da década de 2000. Segundo a própria, a empresa é responsável pela valorização de cerca de 40% dos pneus usados gerados em Portugal (Recipneu, 2010b).



**Figura 3.1:** Localização da Recipneu e instalações (adaptado de Recipneu, 2010b).

### 3.1.1 Tecnologia aplicada

---

A tecnologia de reciclagem de pneus usados instalada pela empresa, utiliza o processo criogénico. Este fabrica, a temperaturas negativas, pós e granulados de borracha de qualidade superior, para aplicações como matéria-prima e como produto final (Recipneu, 2010c).

De acordo com a Recipneu (2010c), o processo industrial desenvolve-se em três fases:

1. Fragmentação da matéria-prima;
2. Processamento Criogénico;
3. Ensacamento e Armazenamento.

A primeira fase inicia-se com o encaminhamento dos pneus para uma fragmentadora. No caso de pneus que ainda possuam aros metálicos, antes de serem encaminhados para a fragmentadora, são colocados num equipamento hidráulico que realiza a extracção do aro metálico. Seguidamente, os pneus são fragmentados em pequenos troços, de secção homogénea, através de um processo de corte por lâminas, obtendo-se o produto designado por chip. A empresa patenteou recentemente o produto MADRE ® - material agregado derivado de resíduos. Este produto é obtido a partir da fragmentação dos PU, incluindo uma remoção de contaminantes orgânicos e classificação dimensional (Recipneu, 2010d)

Este produto da Recipneu encontra-se dividido em duas classes: MADRE®TM e MADRE®TL. Os produtos diferem nas suas dimensões, sendo as classes *Medium* e *Large* atribuídas de acordo com a norma AFNOR XP T47-751. Estas duas classes apresentam algumas diferenças na sua composição como se pode observar no quadro 3.1. De acordo com as especificações técnicas definidas pela Recipneu, as duas classes apresentam como características: (a) grande estabilidade; (b) resistência a agentes físicos e químicos (radiação ultra-violeta e de infravermelhos, humidade, envelhecimento atmosférico e oxidação, esforços de abrasão e esmagamento); (c) resistência térmica granular sete a oito vezes superior à de um solo granular; e (d) produto não tóxico, quase inodoro, não biodegradável e insolúvel em águas pluviais e superficiais.

**Quadro 3.1:** Propriedades dos produtos MADRE®TM e MADRE®TL (Recipneu, 2010d).

Propriedades	MADRE®TM				MADRE®TL			
Massa específica	1,30 +/- 0,10 kg/dm <sup>3</sup>				1,55 +/- 0,06 kg/dm <sup>3</sup>			
Limites dimensionais	40-140 mm				50-200 mm			
Dureza shore A	55 +/- 3				66 +/- 3			
Comportamento sob compressão	Força de compressão (kPa)	Densidade a granel	Porosidade total (%)	Permeabilidade (m/s)	Força de compressão (kPa)	Densidade a granel	Porosidade total (%)	Permeabilidade (m/s)
	100	0,90	32	$2,3 \times 10^{-4}$	100	0,88	43	$2,4 \times 10^{-4}$
	200	1,01	23	$1,4 \times 10^{-4}$	200	0,97	37,5	$1,7 \times 10^{-4}$
	300	1,08	17	$8,4 \times 10^{-4}$	300	1,02	34	$1,3 \times 10^{-4}$
	400	1,13	14	$4,5 \times 10^{-5}$	400	1,06	31,5	$1,0 \times 10^{-4}$
	500	1,17	10,5	$1,4 \times 10^{-5}$	500	1,09	29,5	$7,9 \times 10^{-5}$
Condutividade térmica	0,1-0,35 W/m.K							
Ponto de ignição	315 +/- 25°C							
Absorção de água	2 a 4 %							
Densidade a granel (compacta)	0,70 +/- 0,10							
Coefficiente de Poisson	0,25-0,35							
Compressibilidade	30 a 60 %							

Após o corte dos pneus, estes sofrem o processo criogénico primário. Este realiza a separação completa e individualizada da borracha, aço e têxteis sem desperdício ou perdas apreciáveis de material (Recipneu, 2010c). Trata-se de um processo controlado automaticamente, e desenrolado sob atmosfera inerte, a partir do qual se produz os granulados de borracha.

### 3.1.2 Armazenamento da matéria-prima e chips de pneus usados

Os PU que chegam às instalações da Recipneu, são armazenados na área envolvente da fábrica, dispostos em pilhas não cobertas, como ilustra a figura 3.2. Os pneus usados, após sofrerem a primeira fragmentação, dando origem aos chips de pneus usados (MADRE®), são também armazenados em pilhas na área envolvente da fábrica, sem qualquer cobertura, estando por isso sujeitos às condições atmosféricas que existam na zona. O granulado obtido transita para diversos silos, de onde é ensacado, sobre paletes, em big-bags de ráfia sintética. Também este produto está sujeito às condições climáticas da zona, sendo armazenados na zona envolvente das instalações até à sua expedição.

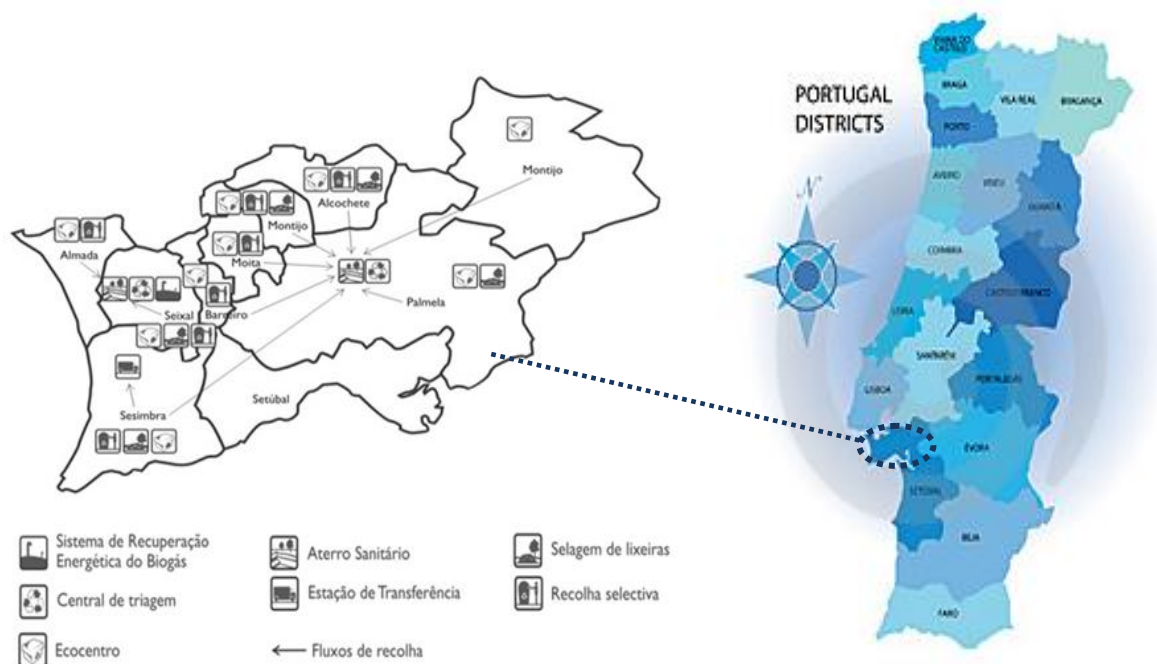


**Figura 3.2:** Zona envolvente das instalações da Recipneu (Maldonado, 2009).

### 3.2 Utilização de brita calcária – Amarsul

A Amarsul – Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos S.A., foi constituída em 1997 (Decreto-Lei nº 53/97 de 4 de Março) tendo-lhe sido atribuída a concessão de exploração e gestão do Sistema Multimunicipal de Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos da Margem Sul do Tejo, por um período de 25 anos (Amarsul, 2010a).

Actualmente, a Amarsul tem a concessão para o tratamento e valorização dos resíduos sólidos urbanos dos 9 municípios da Península de Setúbal. As suas infra-estruturas estão localizadas nos três Ecocentros em Palmela, Seixal e Setúbal (figura 3.3), para além das componentes pertencentes ao Sistema de Recolha Selectiva (Ecopontos e Ecocentros) (Amarsul, 2010b).



**Figura 3.3:** Localização das instalações da Amarsul (adaptado de Amarsul, 2010b).

A recolha da amostra de brita calcária foi totalmente da responsabilidade da Amarsul, tendo sido recolhida nas próprias instalações do Aterro, em Palmela.

### 3.3 Aplicação de chips de pneus usados como substituto de material drenante no Aterro da Amarsul Palmela

---

Actualmente, a Amarsul possui dois aterros em exploração, o Aterro de Palmela que recebe RU de Alcochete, Barreiro, Moita, Montijo, Palmela e Sesimbra, e o Aterro do Seixal que recebe RU de Almada e Seixal (Amarsul, 2010b). A exploração teve início no ano de 1997, tendo sido recepcionados e depositados nesse ano um total de 2 659 154 toneladas de resíduos, predominantemente urbanos (EGF, 2007).

Em 2007 a Amarsul lançou um concurso público internacional de concepção-construção para selagem de 4 células (células 1, 2, 3 e 4 da figura 3.4) do aterro de Palmela, a qual ficou à responsabilidade da Empresa Geral de Fomento (EGF) (Cabeças e Dorés, 2008).



**Figura 3.4:** Vista aérea do Aterro da Amarsul em Palmela (Gomes, 2009).

Em 2007, a EGF, do grupo Águas de Portugal, iniciou o projecto de substituição de material britado da camada drenante na selagem de uma célula experimental do aterro da Amarsul em Palmela, com a aplicação de chips de pneus (Cabeças e Dore, 2008). O projecto previa a aplicação de chips com um calibre nominal de 150 mm e um volume de cerca de 5300 m<sup>3</sup> de chips necessários para a execução da camada de drenante. Esta substituição de material mineral drenante por chips de pneus abrangeu uma área com cerca de 1,0 ha. A execução da aplicação de chips de pneus ocorreu no ano de 2008 (Gomes, 2009). Assim, a estratigrafia proposta para o sistema de encerramento deste projecto foi a apresentada no quadro 3.2 (Gomes, 2009).

Não estando os chips de pneus usados isentos de elementos metálicos, foi aplicada uma camada de protecção com recurso a geotêxtil de protecção com 270 g/m<sup>2</sup>, sobrepondo a este material, uma camada de chips de pneus usados com cerca de 50 cm de espessura, garantindo assim a integridade da geomembrana (Gomes, 2009).

**Quadro 3.2:** Estratigrafia proposta para sistema de encerramento em célula do Aterro Amarsul.

<b>Topo do Aterro</b>	<b>Camada de regularização</b>
	Camada de drenagem de gases com uma espessura de 25 cm
	Camada de solos seleccionados com uma espessura de 30 cm e tela de PEAD
	Geocompósito bentonítico
	Camada drenante de chips de pneus com uma espessura de 50 cm
	Terras de cobertura com uma espessura de 70 cm
	Coberto Vegetal com uma espessura de 30 cm
<b>Taludes do Aterro</b>	Camada de regularização
	Camada de drenagem de gases com uma espessura de 25 cm
	Geocompósito bentonítico
	Geomembrana em PEAD com 1,5 cm de espessura
	Geocompósito drenante
	Terras de cobertura com uma espessura de 70 cm
	Coberto vegetal com uma espessura de 30 cm

Segundo o mesmo projecto, a área onde os chips estão aplicados encontra-se isolada do resto da cobertura, graças à execução de uma cavidade. Esta apresenta um fundo com uma estrutura em telhado invertido, com uma inclinação mínima de 2%, definindo assim os caminhos preferenciais para o escoamento das águas pluviais. Na superfície interior da

cavidade, após a aplicação dos chips foi colocada uma tubagem para drenagem em PEAD, DN 315. O comprimento destas tubagens não ultrapassa os 50 metros, sendo que a área de influência máxima prevista para cada tubagem é de 2500 m<sup>2</sup>. Assim, as águas pluviais são drenadas através dos chips e conduzidas a um depósito localizado no exterior da célula encerrada. Da mesma forma, existe uma construção semelhante para um sistema de recolha de águas pluviais precipitadas sobre a cobertura, fora da zona de colocação de chips. Os dois depósitos de armazenamento apresentam uma ligação à rede de drenagem de águas residuais do aterro, assegurando o tratamento da água recolhida e armazenada (Gomes, 2009).





## **CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA, MATERIAIS E MÉTODOS**

---



## Capítulo 4- Metodologia, materiais e métodos

---

### 4.1 Objectivos

---

O primeiro objectivo do presente trabalho consiste em analisar as características de chips de pneus, para verificar a sua possível aplicação em sistemas de drenagem de aterros sanitários. De forma a serem estudadas estas características, optou-se por um estudo de lixiviação de metais, fazendo variar o pH, com a finalidade de observar o diferente comportamento químico deste material em cenários distintos. Num primeiro ensaio, não foi efectuada qualquer alteração nos valores de pH da água utilizada, de forma a simular as condições mais semelhantes ao que se passa num contexto real, onde os chips de pneus entram em contacto com águas pluviais. Foram também seleccionados dois intervalos de pH extremos, de forma a verificar o comportamento deste material em situações adversas. Vários autores referem que alguns metais tendem a aparecer em maior concentração em meios ácidos, devido à reacção existente entre o metal e o ião  $H^+$  (Liu *et al.*, 1998), enquanto que outros aumentam a sua solubilidade maioritariamente em meios alcalinos (van Der Sloot e Dijkstra, 2004).

Da mesma forma, foram realizados ensaios a pH natural e ácido a amostras de brita calcária, material natural e inerte, que é usualmente utilizado como camada drenante em aterros. Estes ensaios permitem-nos realizar uma análise comparativa entre os dois tipos de material, verificando as vantagens e desvantagens associadas a cada um deles.

O segundo objectivo do presente trabalho consiste em verificar a libertação de diversos metais em contexto real, e quais as implicações que podem resultar da utilização de chips de pneus usados em sistemas de drenagem de cobertura final de aterros sanitários. Assim, foi feita a recolha de amostras de águas pluviais drenadas por sistemas de drenagem constituídos por chips de pneus usados e brita calcária, presentes no aterro da Amarsul Palmela. Desta forma, esta recolha permite-nos comparar os valores libertados para chips de pneus usados e para brita calcária, e ainda relacionar os valores verificados em contexto real, com os resultados dos ensaios realizados em meio laboratorial.

## 4.2 Cronograma do trabalho prático

---

O trabalho experimental decorreu entre Abril de 2010 e Fevereiro de 2011, de acordo com o cronograma apresentado no quadro 4.1. O trabalho iniciou-se com a solicitação das amostras de chips de pneus usados à Recipneu, seguindo-se uma visita às instalações com recolha das amostras, no dia 29 de Abril de 2010.

A primeira parte da componente experimental teve início na primeira semana de Maio, onde foram realizados os primeiros ensaios de lixiviação, que decorreram ao longo dos meses de Maio e Junho, e novamente em Novembro e Dezembro de 2010. Em Fevereiro de 2011 foram efectuadas as últimas repetições para confirmação de resultados. Após os ensaios de lixiviação, os eluatos foram enviados para o laboratório Requimte, para determinação dos metais por espectrometria de emissão atómica por plasma acoplado induzido.

A segunda parte da componente experimental teve início com a visita ao Aterro Amarsul em Palmela em Maio de 2010, com o objectivo de analisar as condições de campo e definir as características de recolha das águas pluviais. No entanto, a recolha de amostras só se iniciou em Novembro de 2010 devido à falta de episódios de precipitação acentuada, que permitissem a recolha das amostras. Assim, as recolhas de águas pluviais foram feitas entre Novembro de 2010 e Janeiro de 2011.



## 4.3 Ensaios de Lixiviação Laboratoriais

---

### 4.3.1 Selecção e características das amostras

---

Para a selecção das amostras de chips de pneus usados, entrou-se em contacto com a Recipneu. As amostras de chips, provêm de pneus usados de veículos ligeiros, possuindo um diâmetro médio de 50 x 50 mm (Figura 4.1). Esta selecção de diâmetro deve-se a condições experimentais necessárias, nomeadamente com a possibilidade de inserir os chips em recipientes específicos. Os chips de pneus seleccionados foram colhidos imediatamente após o seu corte.

A colheita da brita calcária foi da responsabilidade da Amarsul. Esta foi realizada nas instalações do próprio aterro. O critério da dimensão já mencionado para os chips de pneus usados, foi também utilizado, pelas mesmas razões, sendo que em termos médios as dimensões da brita eram de 30x25 mm (Figura 4.2).

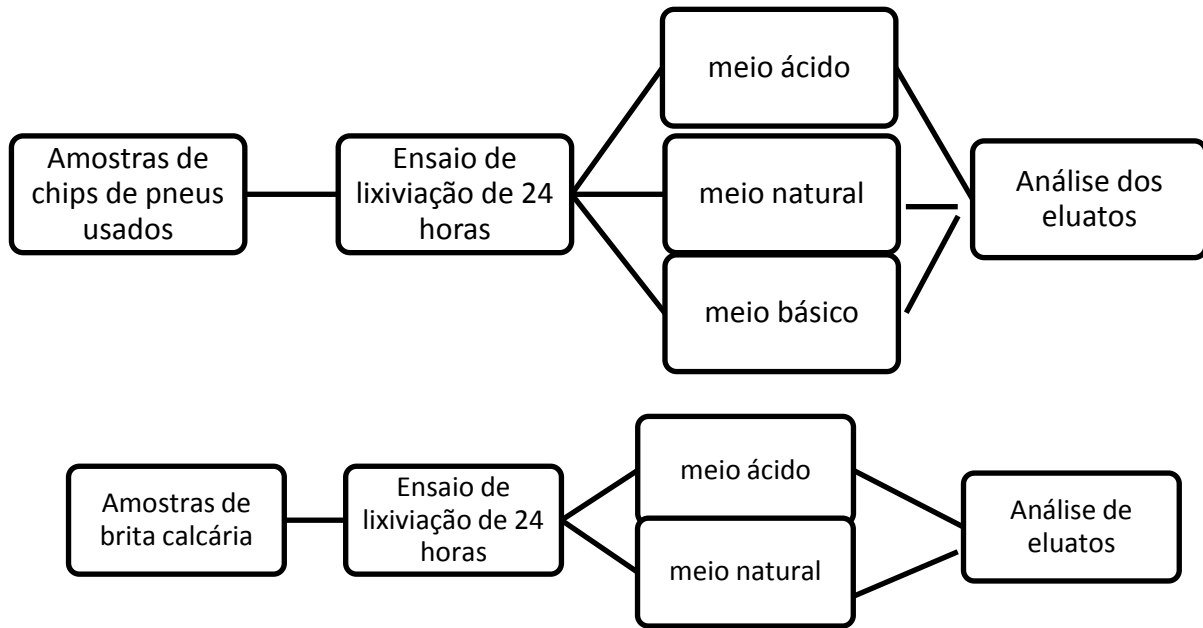


**Figuras 4.1 e 4.2:** Amostras de chips de pneus usados e brita calcária utilizadas.

### 4.3.2 Planeamento experimental

---

Na figura 4.3 apresenta-se a sequência dos procedimentos experimentais realizados às amostras de chips de pneus e brita calcária.



**Figura 4.3:** Sequência dos procedimentos experimentais realizados às amostras de chips de pneus usados e brita calcária.

### 4.3.3 Métodos, Materiais e procedimentos

A classificação dos resíduos é baseada normalmente na avaliação do comportamento deste em contacto com um solvente. Assim, a lixiviação é o procedimento mais utilizado para analisar a potencialidade de transferência de matéria para o meio natural (Cauduro e Roberto, 2002).

Os ensaios de lixiviação são utilizados para determinar ou avaliar a estabilidade química dos resíduos, quando em contacto com soluções aquosas, permitindo assim verificar o grau de imobilização de contaminantes. Encontram-se disponíveis diversos ensaios de lixiviação, mas nenhum deles é capaz de reproduzir, isoladamente, todas as condições variáveis que se observam na natureza (Rocca, 1993 *in* Cauduro e Roberto, 2002).

O processo de lixiviação é fundamental para o entendimento de como avaliar a perigosidade de um resíduo. Se as águas superficiais ou subterrâneas entram em contacto com um material, cada um dos seus constituintes dissolve-se a uma taxa finita (Cauduro e Roberto, 2002). Igualmente, muitos resíduos ditos impermeáveis como argilas, tijolos, e vidros de qualquer natureza, podem ser dissolvidos, pois não existe nenhum material que seja totalmente insolúvel (Conner, 1990).



É importante referir que, tal como Edeskar (2004) salienta, estes estudos de lixiviação retratam geralmente casos extremos, onde as condições laboratoriais simulam os piores cenários possíveis. Na maior parte das vezes, acontece também que os ensaios são efectuados mediante determinadas condições, devidamente definidas e controladas, que poderão não ser extrapoladas para contexto real.

Foram produzidos eluatos resultantes do contacto entre chips de pneus usados e de brita calcária, em meio natural (sem adição de ácido/base) de acordo com a **Norma Europeia EN 12457/4**. Para a simulação de meio ácido/ básico foi realizado um procedimento semelhante com a adição inicial de ácido clorídrico (HCl) ou hidróxido de sódio (NaOH). Para determinar quais as quantidades de cada reagente a serem utilizadas, foram feitos estudos preliminares com água destilada, de forma a verificar as quantidades de ácido e base que garantiam a estabilização do pH durante as 24 horas de ensaio.

#### 4.3.3.1 Material

Os aparelhos e reagentes utilizados nos ensaios de lixiviação, foram os seguintes:

- Agitador mecânico rotativo com capacidade para 12 frascos de plástico de 2 litros (12 amostras)
- Balança analítica – *Scout Pro OHAUS 400g*
- Aparelho medidor de pH – *Sartorius Docu-pH meter*
- Condutivímetro – *HANNA Instruments HI 98703*
- Sistema de filtração
- Água destilada
- Ácido clorídrico (HCl 1N)
- Ácido nítrico (HNO<sub>3</sub> a 65%)
- Hidróxido de sódio (NaOH 1N ou 15%)

#### 4.3.3.2 Procedimento

Os procedimentos seguidos para a montagem e realização dos ensaios de lixiviação foram os seguintes (figura 4.7):

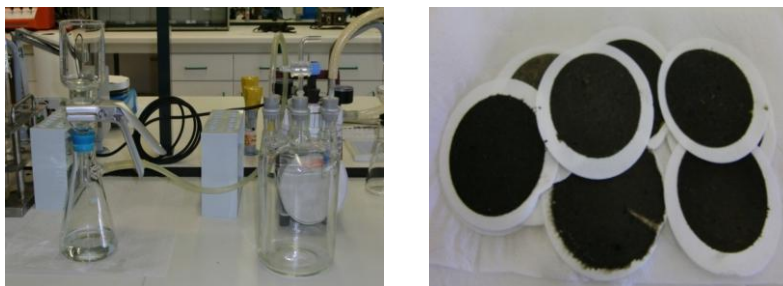
- Adicionou-se a cada frasco de plástico de 2 litros, 100 gramas de amostra de chips de pneus usados ou de brita calcária.
- Adicionou-se a cada frasco 1 litro de água destilada.
- Para os ensaios em meio ácido, foi adicionado algumas gotas de ácido clorídrico, até alcançar o pH desejado. Para os ensaios em meio básico, foi adicionado algumas gotas de hidróxido de sódio, até alcançar o pH pretendido. Para os três tipos de ensaio foi determinado o pH inicial.
- Os frascos foram bem fechados e colocados de forma segura no agitador mecânico (figura 4.4), colocado numa sala climatizada a 16°C, mantendo constante a temperatura, e programado para fazer a agitação das amostras a uma velocidade constante de 10 rpm, num período de 24 horas.



**Figura 4.4:** Ensaio de lixiviação.

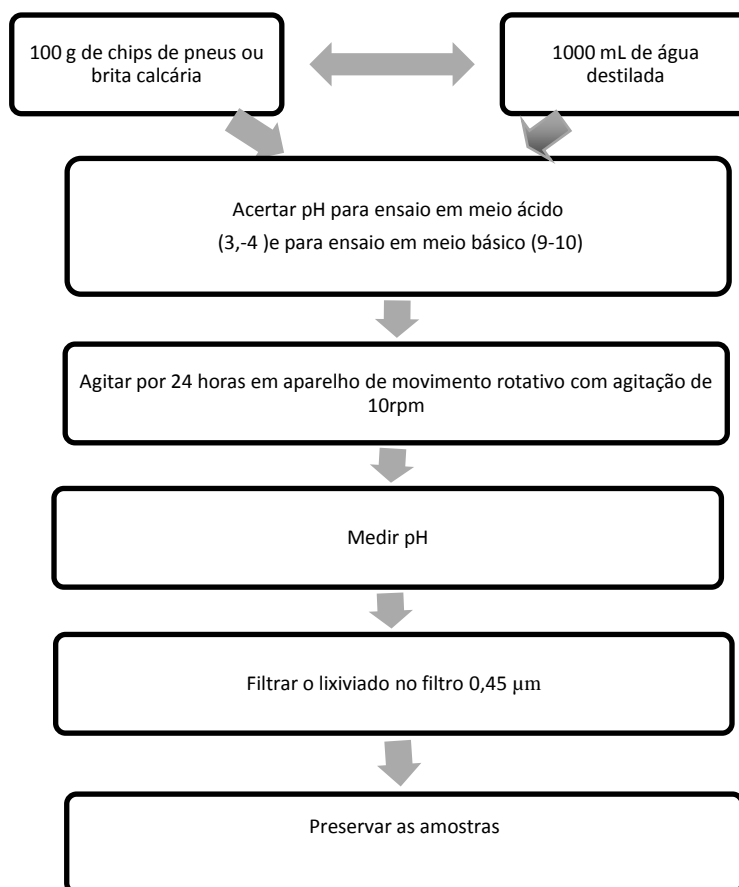
- Após o período de 24 horas retiraram-se os frascos e deixaram-se em repouso cerca de 20 minutos.
- Preparou-se o sistema de filtração, que inclui bomba de vácuo, kitasato, copo, membrana de filtração e filtros de 0,47 µm de porosidade.

- Pipetou-se dos frascos de plástico de 2 L, que estiveram em agitação, 100 mL de eluato, transferindo-os em seguida para os filtros colocados no sistema de filtração (figura 4.5).



**Figuras 4.5 e 4.6:** Sistema de Filtração utilizado e aspecto dos filtros após a filtração.

- Após a filtração (figura 4.6), retirou-se o eluato para um copo de vidro para medição do pH.
- Após a medição deste parâmetro, colocou-se o eluato num frasco de plástico de 100 mL, devidamente identificado, ao qual se adicionou 0,5 mL de ácido nítrico a 65%, para preservação das amostras, e colocaram-se numa arca frigorífica, com temperatura entre 1°C e 3°C, até à realização das análises químicas dos metais pesados.



**Figura 4.7:** Procedimento experimental utilizado seguido nos ensaios de lixiviação laboratoriais.

Como o agitador mecânico apenas dá para a utilização simultânea de doze recipientes, os ensaios de lixiviação foram realizados de uma forma sequencial, de acordo com o indicado na figura 4.8.



**Figura 4.8:** Sequência dos ensaios de lixiviação realizados, utilizando chips de pneus e brita calcária.

#### 4.3.3.3 Seleção de elementos a analisar após lixiviação

Devido ao orçamento e tempo disponível, é necessária uma seleção coerente dos elementos a analisar nos eluatos resultantes dos ensaios de lixiviação. Para a escolha dos elementos a analisar foram utilizados os seguintes critérios:

- (1) Presença na constituição dos pneus ou no seu processo de fabrico;
- (2) Presença em trabalhos técnicos anteriormente realizados;
- (3) Relevância segundo enquadramento legislativo nomeadamente:
  - No DL n.º 183/2009, onde se encontram estabelecidos os valores limites de lixiviação de uma lista de metais, para as diversas categorias de resíduos;
  - No DL n.º 236/98 de 1 de Agosto que estabelece os valores limite para a Qualidade da Água e DL n.º 243/2001 de 5 de Setembro que estabelece os valores limite para a Qualidade da água para consumo humano.

Assim, no Quadro 4.2, encontram-se listados os metais constituintes dos pneus ou utilizados no seu processo de fabrico, assim como a sua presença no DL n.º 183/2009, e presença em trabalhos semelhantes já realizados.

**Quadro 4.2:** Lista de possíveis metais a analisar, segundo critérios de escolha.

Metais com limites de lixiviação estabelecidos pelo DL 183/2009	Elemento	Possíveis Fontes	Presença em trabalhos realizados
	Arsénio (As)	Utilizado em aditivos de ligas metálicas	Aydilek <i>et al.</i> , 2006; Bocca <i>et al.</i> , 2009; Brophy and Graney, 2004; Yoon <i>et al.</i> , 2005.
	Bário (Ba)	Produção de borracha (BaSO <sub>4</sub> )	Aydilek <i>et al.</i> , 2006; Bocca <i>et al.</i> , 2009; Brophy and Graney, 2004; Yoon <i>et al.</i> , 2005.
	Cádmio (Cd)	Ligas metálicas	Bocca <i>et al.</i> , 2009; Brophy and Graney, 2004; Mota <i>et al.</i> , 2009; Nelson <i>et al.</i> , 1994; San Miguel <i>et al.</i> , 2002; Yoon <i>et al.</i> , 2005.
	Crómio (Cr)	Ligas metálicas	Aydilek <i>et al.</i> , 2006; Bocca <i>et al.</i> , 2009; Humprey e Katz, 2001; Mota <i>et al.</i> , 2009; San Miguel <i>et al.</i> , 2002; Yoon <i>et al.</i> , 2005.
	Cobre (Cu)	Ligas metálicas	Aydilek <i>et al.</i> , 2006; Bocca <i>et al.</i> , 2009; Nelson <i>et al.</i> , 1994.
	Mercúrio (Hg)	Catalisador em reacções químicas de polímeros	Mota <i>et al.</i> , 2009.
	Molibdénio (Mo)	Ligas metálicas, pigmentos para compostos de borracha	Bocca <i>et al.</i> , 2009; San Miguel <i>et al.</i> , 2002.
	Níquel (Ni)	Ligas metálicas, catalisador de reacções químicas em óleos	Aydilek <i>et al.</i> , 2006; Bocca <i>et al.</i> , 2009; Nelson <i>et al.</i> , 1994.
	Chumbo (Pb)	Aditivos de ligas metálicas (Inibidor de corrosão), preservadores de têxteis	Aydilek <i>et al.</i> , 2006; Bocca <i>et al.</i> , 2009; Mota <i>et al.</i> , 2009; Nelson <i>et al.</i> , 1994; San Miguel <i>et al.</i> , 2002.
	Antimónio (Sb)	Ligas metálicas	Bocca <i>et al.</i> , 2009.
	Selénio (Se)	Aditivo no processo de borracha vulcanizada	Aydilek <i>et al.</i> , 2006; Mota <i>et al.</i> , 2009; Yoon <i>et al.</i> , 2005.
Metais sem limites de lixiviação estabelecidos	Zinco (Zn)	Vulcanização da borracha e elastómeros	Aydilek <i>et al.</i> , 2006; Bocca <i>et al.</i> , 2009; Brophy e Graney, 2004; Humprey e Katz, 2001; Mota <i>et al.</i> , 2009; Nelson <i>et al.</i> , 1994; San Miguel <i>et al.</i> , 2002; Wik e Dave, 2006; Selbes, 2009; Yoon <i>et al.</i> , 2005.
	Alumínio (Al)	Ligas metálicas	Bocca <i>et al.</i> , 2009; Selbes, 2009; Yoon <i>et al.</i> , 2005.
	Ferro (Fe)	Principal constituinte ligas metálicas (aço)	Aydilek <i>et al.</i> , 2006; Bocca <i>et al.</i> , 2009; Brophy e Graney, 2004; Humprey e Katz, 2001; Selbes, 2009; Yoon <i>et al.</i> , 2005.
	Manganésio (Mn)	Aditivo ligas metálicas (aço)	Aydilek <i>et al.</i> , 2006; Bocca <i>et al.</i> , 2009; Brophy e Graney, 2004; Humprey e Katz, 2001; Selbes, 2009; Yoon <i>et al.</i> , 2005.

Relativamente aos doze metais referidos no DL n.º 183/2009, após a pesquisa bibliográfica, verificou-se que todos eles estão presentes na constituição dos pneus, ou no seu processo de fabrico. Da mesma pesquisa, resultaram três elementos não referidos no DL n.º 183/2009, mas que apresentam uma forte presença na constituição de pneus, e que devido à sua perigosidade para o ambiente, foi também considerada relevante a sua análise. O quadro 4.3 apresenta então a concentração destes quinze metais nos resultados dos ensaios de lixiviação consultados.

Da análise dos quadros 4.2 e 4.3, confirma-se a presença dos quinze elementos metálicos sugeridos, pelo menos em um ensaio de lixiviação dos dez trabalhos consultados. Importa realçar que os elementos analisados nos dez trabalhos consultados não são fixos, havendo diversas combinações de elementos analisados. Para o molibdénio, níquel, antimónio, zinco, ferro e manganésio, em todos os trabalhos que a sua análise foi realizada, foi detectada a sua presença. No caso do arsénio, bário, cádmio e alumínio, não foi detectada a sua presença em apenas um dos trabalhos em que a sua determinação foi realizada. O mercúrio e selénio foram detectados apenas num ensaio de lixiviação enquanto o cobre e o chumbo foram detectados em cerca de metade dos ensaios realizados.

**Quadro 4.3:** Concentrações (µg/L) de elementos metálicos determinadas em ensaios de lixiviação consultados.

Artigo/ Metal (µg/L)	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Zn	Al	Fe	Mn	Observações
Aydillek <i>et al.</i> , 2006	20	200	X	90	20	X	X	100	7	X	7	1500	X	156000	6800	Ensaio em campo
Bocca <i>et al.</i> , 2009	2,40	2050	0,70	10,0	216	n.d	6,00	10,0	27,0	18,0	n.d	62120	3940	3220	220	Ensaio laboratorial pH 5
Brophy e Graney, 2004	349	1720	55	n.d	n.d	n.d	X	X	n.d	X	n.d	623	X	39800	16700	Ensaio em campo
Humphrey e Katz, 2001	n.d	n.d	n.d	1240	n.d	X	X	X	n.d	X	X	X	n.d	292	7000	Ensaio em campo
Mota <i>et al.</i> , 2009	X	X	1	3	X	<0,8	X	X	19	X	X	6900	X	X	X	Ensaio laboratorial pH 4-5
Nelson <i>et al.</i> , 1994	X	X	0,6	X	6,7	X	X	< 10	6,7	X	X	755	X	X	X	Ensaio laboratorial a pH 8
San Miguel <i>et al.</i> , 2002	X	X	3	50	X	X	70	10	X	X	X	3000	X	X	X	Ensaio laboratorial a pH 7
Selbes, 2009	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	599	18	734	17	Ensaio laboratorial a pH 4
Wik e Dave, 2006	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	590	X	X	X	Ensaio laboratorial a pH 8
Yoon <i>et al.</i> , 2005	18,6	113,2	1,1	55,1	X	X	X	X	X	X	X	23	189,1	92,8	164,9	Ensaio em campo

Bocca *et al.* (2009) e Mota *et al.* (2009) realizaram ensaios de lixiviação bastante semelhantes. Ambos foram realizados em condições laboratoriais, onde simularam os efeitos da lixiviação em meio ácido. Nestes ensaios, referem a relação L/S (relação líquido / peso seco da amostra) utilizada, sendo por isso possível determinar as concentrações dos elementos determinados em mg/kg e compará-los com os valores limite estabelecidos na legislação. O quadro 4.4 apresenta essa comparação. Importa realçar que esta comparação é possível visto a relação L/S utilizada nos dois ensaios ter sido a estipulada no DL n.º 183/2009 (L/S = 10 l/kg).

**Quadro 4.4:** Comparação entre valores obtidos em ensaios de lixiviação consultados e limites estabelecidos pelo Decreto-lei 186/2009 para resíduos inertes.

	Bocca <i>et al.</i> , 2009 (mg/kg)	Mota <i>et al.</i> , 2009 (mg/kg)	Limite estabelecido (mg/kg)
As	0,024	X	0,5
Ba	20,5	X	20
Cd	0,007	0,01	0,04
Cr	0,1	0,03	0,5
Cu	2,16	X	2
Hg	n.d	0,008	0,01
Mo	0,06	X	0,5
Ni	0,1	X	0,4
Pb	0,27	0,19	0,5
Sb	0,18	X	0,06
Se	n.d	X	0,1
Zn	6,21	0,69	4

Legenda: n.d – Não detectado

Da análise do quadro 4.4, verifica-se que o bário, cobre, antimónio e zinco podem constituir elementos de elevada importância, devido às suas concentrações nos ensaios realizados serem superiores ao limite estabelecido.

#### 4.3.3.4 Análise de elementos por espectroscopia de emissão atómica

O método analítico utilizado para a determinação dos metais pesados, presentes nos eluatos das amostras dos ensaios de lixiviação, foi a espectrometria de emissão atómica por



plasma acoplado induzido “Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES) ”. O equipamento de ICP-AES disponível no laboratório do Requimte é da marca Horiba Jobin-Yvon modelo Ultima, de observação radial, equipado com um gerador RF de 40.68 MHz e um monocromador tipo Czerny-Turner de 1.00 m. As amostras foram analisadas pela técnica de laboratório responsável por este aparelho. No quadro 4.5 encontram-se os parâmetros operacionais do ICP-AES.

**Quadro 4.5:** parâmetros operacionais do ICP-AES.

Potência	1200 Kw
Caudal Árgon Plasma	12,0 L/min
Caudal Árgon Revestimento	0,3 L/min
Diametro tubo injector nebulizador	3 mm
Câmara nebulização	Ciclónica
Pressão do nebulizador	3 bar
Velocidade da bomba	15 rpm
Caudal de débito da amostra	1.0 mL/min

Através do software JY v5.4 é feita a aquisição de dados e o controlo do aparelho. Os dados são depois exportados automaticamente para o Excel.

Tendo por base a revisão bibliográfica efectuada, foram verificados os valores-limites de detecção dos 15 metais seleccionados para análise. O quadro 4.6 apresenta os intervalos de detecção do equipamento utilizado.

**Quadro 4.6:** Limites de detecção do equipamento ICP-AES dos metais seleccionados.

Metal	Limites de Detecção (µg/L)
As	0,1-1000
Ba	1-1000
Cd	0,01-1000
Cr	0,05-1000
Cu	0,5-1000
Hg	0,1-1000
Mo	0,01-1000
Ni	0,5-1000
Pb	0,1-1000
Sb	0,1-1000
Se	0,5-1000
Zn	1-1000
Al	5-1000
Fe	1-2500
Mn	0,05-1000

A equação utilizada para a determinação dos metais pesados em cada eluato é dada por:

$$C_f = C_i - C_b \quad \text{(equação 4.1)}$$

Onde,  $C_f$  – Concentração final do metal (mg/L);  $C_i$  - Concentração do metal determinado na amostra (mg/L); e  $C_b$  – concentração do metal no branco do referente ensaio (mg/L).

Após a determinação do valor médio obtido para os diferentes parâmetros analisados em cada um dos eluatos, determinou-se a concentração final do metal presente nas amostras pela seguinte equação:

$$CF = C_f \times (V_i/P) \quad \text{(equação 4.2)}$$

Onde,  $CF$  – Concentração final do metal (mg/kg);  $V_i$  – Volume inicial de água destilada (L); e  $P$  – Peso seco da amostra (kg).

## 4.4 Recolha e análise de águas pluviais – Aterro Amarsul

---

### 4.4.1 Características das Recolhas

---

As recolhas de águas pluviais foram feitas nos dois depósitos já referidos, existentes a jusante e no exterior da célula encerrada, em que o sistema de drenagem é constituído por chips de pneus usados, e brita calcária. Estes dois depósitos são independentes sendo que cada um deles recebe águas pluviais encaminhadas das duas diferentes zonas da célula, uma primeira zona onde foram utilizados chips de pneus usados para a concepção do sistema de drenagem, e uma segunda onde foi utilizada uma camada de brita para o mesmo efeito.

O volume recolhido deveria ser suficiente para a determinação da concentração de diferentes metais, assim como parâmetros físicos (pH e condutividade). Assim, definiu-se como volume de recolha cerca de 2 litros de água pluvial drenada em cada reservatório.

#### 4.4.2 Planeamento experimental

---

Após uma primeira visita ao aterro sanitário, de forma a verificar, e decidir quais seriam os pontos de recolha das águas pluviais drenadas, o trabalho experimental teve início em outubro de 2010.

As recolhas só poderiam ser feitas durante ou após momentos de precipitação intensa, que garantissem um caudal suficiente de transporte da célula encerrada para os depósitos, e um armazenamento temporário de volumes de água suficientes para se efectuar a recolha.

Assim, estabeleceu-se que as recolhas deveriam ser efectuadas sempre que se verificasse um período de cerca de 24 horas de precipitação intensa, e que se intervalasse as colheitas pelo menos uma semana entre recolhas consecutivas.

#### 4.4.3 Métodos, materiais e procedimentos

---

##### 4.4.3.1 Material

Os aparelhos e reagentes utilizados nos ensaios de lixiviação, foram os seguintes:

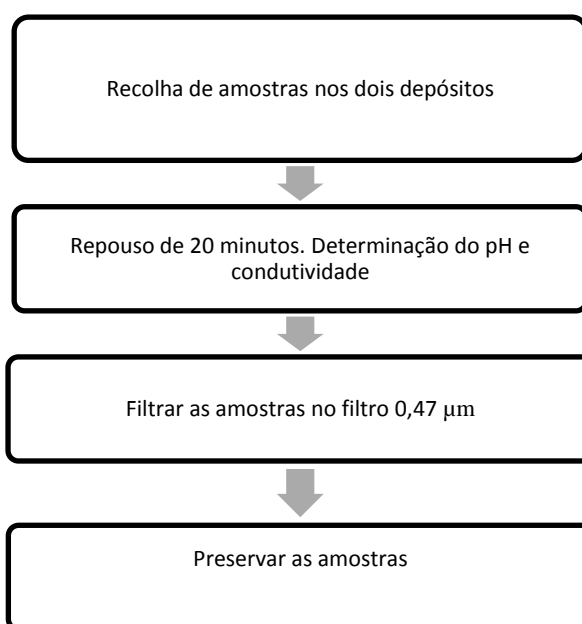
- Aparelho medidor de pH – *Sartorius Docu-pH meter*
- Condutivímetro – *HANNA Instruments HI 98703*
- Filtros 0,47 µm
- Sistema de filtração
- Ácido nítrico (HNO<sub>3</sub> a 65%)

##### 4.4.3.2 Procedimento

O procedimento seguido para a recolha de amostras de águas pluviais nos depósitos foi (figura 4.9):

- Caso existisse caudal proveniente da célula encerrada inseria-se as garrafas de 1 L na entrada do depósito, de forma a recolher 1 L de água de cada vez.

- No caso de já não existir caudal, ou se este não fosse suficiente para a captação de 2 L de água em tempo útil, inseria-se as garrafas de 1 L no depósito, onde se encontrava um certo volume de água armazenado.
- Já em laboratório, retiraram-se os frascos e deixaram-se em repouso cerca de 20 minutos. Durante esse período determinou-se o pH e condutividade das amostras.
- Preparou-se o sistema de filtração, que inclui bomba de vácuo, kitasato, copo, membrana de filtração e filtros de 0,47  $\mu\text{m}$  de porosidade.
- Pipetou-se dos frascos de plástico de 1 L, 100 mL de eluato, transferindo-os em seguida para os filtros colocados no sistema de filtração.
- Os eluatos colocaram-se em frascos de plástico de 100 mL, devidamente identificado, ao qual se adicionou 0,5 mL de ácido nítrico a 65%, para preservação das amostras, e colocaram-se numa arca frigorífica, com temperatura entre 1°C e 3°C, até à realização das análises químicas dos metais pesados.
- Como se previa uma possível contaminação os frascos utilizados nas recolhas efectuadas, foram realizados quatro brancos, constituídos por água destilada, que permaneceram em contacto com frascos de 1L durante 24 horas em agitação.



**Figura 4.9:** Procedimento experimental seguido para águas pluviais.

#### **4.4.3.3 Selecção de elementos a analisar por espectroscopia de emissão atómica**

Os elementos metálicos seleccionados para análise por espectroscopia de emissão atómica, foram os mesmos já seleccionados para análise dos ensaios de lixiviação laboratoriais.

## **CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS**

---



## Capítulo 5 - Apresentação e Discussão de Resultados

### 5.1 Resultados dos ensaios de lixiviação laboratoriais

Os resultados obtidos no primeiro conjunto de ensaios de lixiviação, para os parâmetros de controlo pH e condutividade encontram-se de forma detalhada no Anexo II. No quadro 5.1, apresentam-se os resultados médios obtidos, para cada um dos ensaios realizados aos dois tipos de amostra (chips de pneus e brita calcária) e respectivos brancos.

**Quadro 5.1:** Resumo dos resultados do primeiro conjunto de ensaios de lixiviação.

	Meio	Peso da amostra (g)		pH inicial		pH final	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Chips de pneus	Básico	102,71	1,87	9,80	0,07	9,79	0,10
	Natural	100,44	0,68	5,74	0,06	8,29	0,23
	Ácido	100,58	1,46	3,72	0,05	6,80	0,12
Brita calcária	Natural	100,32	0,26	9,73	0,14	9,90	0,02
	Ácido	100,09	0,48	3,67	0,05	8,17	0,09
Branco	Básico			9,74	0,01	9,74	0,04
	Natural			5,39	0,03	5,54	0,10
	Ácido			3,67	0,07	3,68	0,09

Analisando este primeiro conjunto de resultados, verifica-se que existe uma diferença acentuada entre os valores de pH inicial e pH final para o meio ácido, tanto para os ensaios realizados com amostras de chips, como com amostras de brita calcária. No caso dos ensaios realizados com chips, o pH sofreu também uma grande variação em meio natural. Em qualquer um destes casos, verifica-se uma tendência de aumento de pH para meio alcalino.



Visto que o pH dos brancos utilizados mantêm-se relativamente constante ao longo das 24 horas, pode-se pressupor que o motivo da subida do pH nos dois tipos de amostra deve-se aos seus componentes e não aos reagentes utilizados para atingir os meios ácidos e básicos.

De forma a verificar o comportamento do pH ao longo das 24 horas, e concluir acerca de qual o meio predominante no decorrer dos ensaios de lixiviação dos chips de pneus usados, foram feitos ensaios em condições semelhantes às já descritas, onde o objectivo principal era a determinação do pH ao longo do tempo. Foram utilizadas três amostras em dois valores de pH distintos. Os resultados médios obtidos encontram-se no quadro 5.2.

**Quadro 5.2:** Determinação dos valores de pH ao longo de ensaios de lixiviação em meio ácido e meio natural, para chips de pneus usados.

Tempo (horas)	0	2	4	6	24
pH médio (meio ácido)	3,36	4,88	5,88	6,42	6,77
pH médio (meio neutro)	6,24	7,02	7,53	7,58	8,03

Da análise dos resultados verifica-se que, para o meio ácido ao fim de 2 horas de ensaio o pH já aumentou consideravelmente, mas mantém-se ainda o meio ácido, sendo que ao fim de 6 horas, o valor de pH já é bastante próximo do valor de pH final. Assim, pode-se dizer que os ensaios de lixiviados realizados com chips de pneus feitos em meio ácido, foram na realidade realizados em pH ácido apenas durante cerca de duas horas, sendo que nas restantes 22 horas o pH é apenas ligeiramente ácido, com tendência a aproximar-se de valores neutros.

Relativamente ao meio natural, a subida do pH é relativamente mais lenta, sendo que ao fim de 6 horas de ensaio o pH subiu cerca de uma unidade e meia. Assim, pode-se concluir que o pH ao longo das 6 horas iniciais mantém-se em valores neutros sendo que alcança valores alcalinos entre as 6 e as 24 horas.

Assim sendo, a designação de meio ácido, neutro e básico, será utilizada apenas como referência, sendo possível verificar que, estes conceitos não se aplicam aos valores de pH obtidos após as 24 horas, onde o meio ácido deu origem a um meio neutro e os meios natural e básico encontram-se em valores alcalinos.

Seguidamente, apresentam-se nos quadros 5.3 e 5.4 a concentração média de metais pesados, detectados nas amostras de chips de pneus e brita calcária, respectivamente. De forma a transformar esses resultados em mg/kg, foi utilizada a seguinte expressão:

$$A \text{ (mg/kg)} = \frac{c \cdot v}{p}, \quad (\text{equação 5.1})$$

em que **A** representa a concentração de metal expresso em mg/kg peso seco; **c** representa a concentração de metal no eluato, expresso em mg/L; **v** representa o volume de água destilada, expresso em litros, e finalmente **p** que representa o peso seco da amostra, expresso em kg.

Nos dois ensaios foram usados os valores fixos de 1 L de volume de água e 0,1 kg de peso seco da amostra, mantendo-se assim a relação líquido/sólido (L/S) de 10 L/kg. Salienta-se ainda que, através de ensaios preliminares, verificou-se que os valores de humidade das amostras de chips e brita calcária são desprezáveis, pelo que não foi descontado qualquer valor referente a humidade da amostra.

**Quadro 5.3:** Concentrações de metais pesados em chips de pneus, resultantes de ensaios de lixiviação em meio laboratorial

	Meio ácido (pH final 7)			Meio natural (pH final 8)			Meio básico (pH final 10)		
	nº de amostras	média mg/kg	desvio- padrão %	nº de amostras	média mg/kg	desvio- padrão %	nº de amostras	Média mg/kg	desvio- padrão %
<b>As</b>	10	n.d	n.d	10	n.d	n.d	10	n.d	n.d
<b>Ba</b>	8	1,9	87	10	1,11	18	10	1,09	20
<b>Cd</b>	10	n.d	n.d	10	0,04	61	10	0,03	107
<b>Cr</b>	10	0	129	10	0,03	55	10	0,02	43
<b>Cu</b>	10	0,02	96	10	0,1	54	10	0,1	36
<b>Hg</b>	10	n.d	n.d	10	n.d	n.d	10	n.d	n.d
<b>Mo</b>	10	0	154	8	0,03	16	8	0,01	45
<b>Ni</b>	10	0,01	199	10	0,03	56	10	0,02	73
<b>Pb</b>	10	n.d	n.d	10	0,22	54	10	0,14	57
<b>Sb</b>	10	0,01	176	8	0,04	154	8	0,02	60
<b>Se</b>	10	n.d	n.d	10	n.d	n.d	10	n.d	n.d
<b>Zn</b>	10	4,13	53	8	0,62	139	10	0,94	51
<b>Al</b>	10	0,1	299	10	1,01	83	10	1,58	30
<b>Fe</b>	10	1,52	102	10	6,94	87	10	9,77	50
<b>Mn</b>	10	1,02	79	10	0,07	74	10	0,09	38

Legenda: n.d- não detectado/não definido.

**Quadro 5.4:** Concentrações de metais pesados em brita calcária, resultantes de ensaios de lixiviação em meio natural.

	Meio ácido (pH final 8)			Meio natural (pH final 10)		
	nº de amostras	Média mg/kg	Desvio-padrão %	nº de amostras	Média mg/kg	Desvio- padrão %
<b>As</b>	10	n.d	n.d	10	n.d	n.d
<b>Ba</b>	10	2,41	69	10	0,25	77
<b>Cd</b>	10	n.d	n.d	10	0,02	87
<b>Cr</b>	10	0,00	140	10	0,00	86
<b>Cu</b>	10	0,00	311	10	0,02	74
<b>Hg</b>	10	n.d	n.d	10	n.d	n.d
<b>Mo</b>	10	0,00	64	8	0,00	86
<b>Ni</b>	10	n.d	n.d	10	0	0
<b>Pb</b>	10	n.d	n.d	10	0,04	137
<b>Sb</b>	10	n.d	n.d	10	0,01	316
<b>Se</b>	10	n.d	n.d	10	n.d	n.d
<b>Zn</b>	9	0,40	72	10	0	0
<b>Al</b>	10	0,11	75	10	1,49	31
<b>Fe</b>	10	0,00	0	10	0,00	150
<b>Mn</b>	10	0,00	64	10	0,00	83

Legenda: n.d- não detectado/não definido

É importante realçar que em termos estatísticos, os valores médios obtidos são pouco representativos para diversos elementos. De facto, o desvio padrão obtido em relação à média, é por diversas vezes superior a 20%, o que significa que os valores obtidos são muito dispersos (o que se pode verificar no anexo II). Apenas a análise do Bário nos chips de pneus usados nos meios natural e básico apresenta um desvio padrão inferior ou igual a 20%.

Relativamente aos dois tipos de amostras utilizadas, verifica-se que o arsénio, o mercúrio e o selénio não foram detectados em nenhum dos ensaios, o que nos permite concluir que as concentrações destes metais são inferiores ao limite de detecção, ou inexistente.

De uma forma geral, em meio natural, os chips de pneus lixiviam concentrações superiores de metais comparativamente às concentrações de lixiviado de brita (exceptuando o alumínio). Já em meio ácido, verifica-se um comportamento oscilante, sendo que o alumínio, bário, crómio e molibdénio têm concentrações superiores no caso da brita, e o cobre, ferro, manganésio e zinco no caso dos chips de pneus usados.

Relativamente aos chips de pneus, conclui-se que os elementos mais lixiviados, para qualquer um dos meios foram o ferro, bário, zinco e alumínio, sendo que este último é substituído no meio ácido pelo manganésio. O quadro 5.5 apresenta a constituição média

destes elementos em pneus utilizados para a obtenção de granulado de campos desportivos (Bocca *et al.*, 2009).

**Quadro 5.5:** Concentração média dos metais analisados em pneus (adaptado de Bocca *et al.*, 2009) e valores máximos e mínimos lixiviados em chips de pneus usados, resultantes do primeiro conjunto de ensaios de lixiviação.

Metal	Concentração média (mg/kg)	Concentração Lixiviada (mg/kg)	
		Valor mínimo	Valor máximo
<b>Al</b>	755	0,096 (m.a)	1,580 (m.b)
<b>As</b>	0,24	n.d	n.d
<b>Ba</b>	22	1,090 (m.b)	2,116 (m.a)
<b>Cd</b>	0,37	n.d (m.a)	0,0045 (m.n)
<b>Cr</b>	6,2	0,002 (m.a)	0,026 (m.n)
<b>Cu</b>	12	0,019 (m.a)	0,1 (m.b)
<b>Fe</b>	305	1,516 (m.a)	9,765 (m.b)
<b>Hg</b>	0,07	n.d	n.d
<b>Mn</b>	5,2	0,071 (m.n)	1,019 (m.a)
<b>Mo</b>	0,2	0,001 (m.a)	0,092 (m.b)
<b>Ni</b>	2,0	0,006 (m.a)	0,028 (m.n)
<b>Pb</b>	22	n.d (m.a)	0,218 (m.n)
<b>Sb</b>	1,1	0,012 (m.a)	0,202 (m.b)
<b>Se</b>	< 0,3	n.d	n.d
<b>Zn</b>	10,229	0,618 (m.n)	4,134 (m.a)

Legenda: n.d – não detectado; m.a – meio ácido; m.b – meio básico; m.n – meio natural

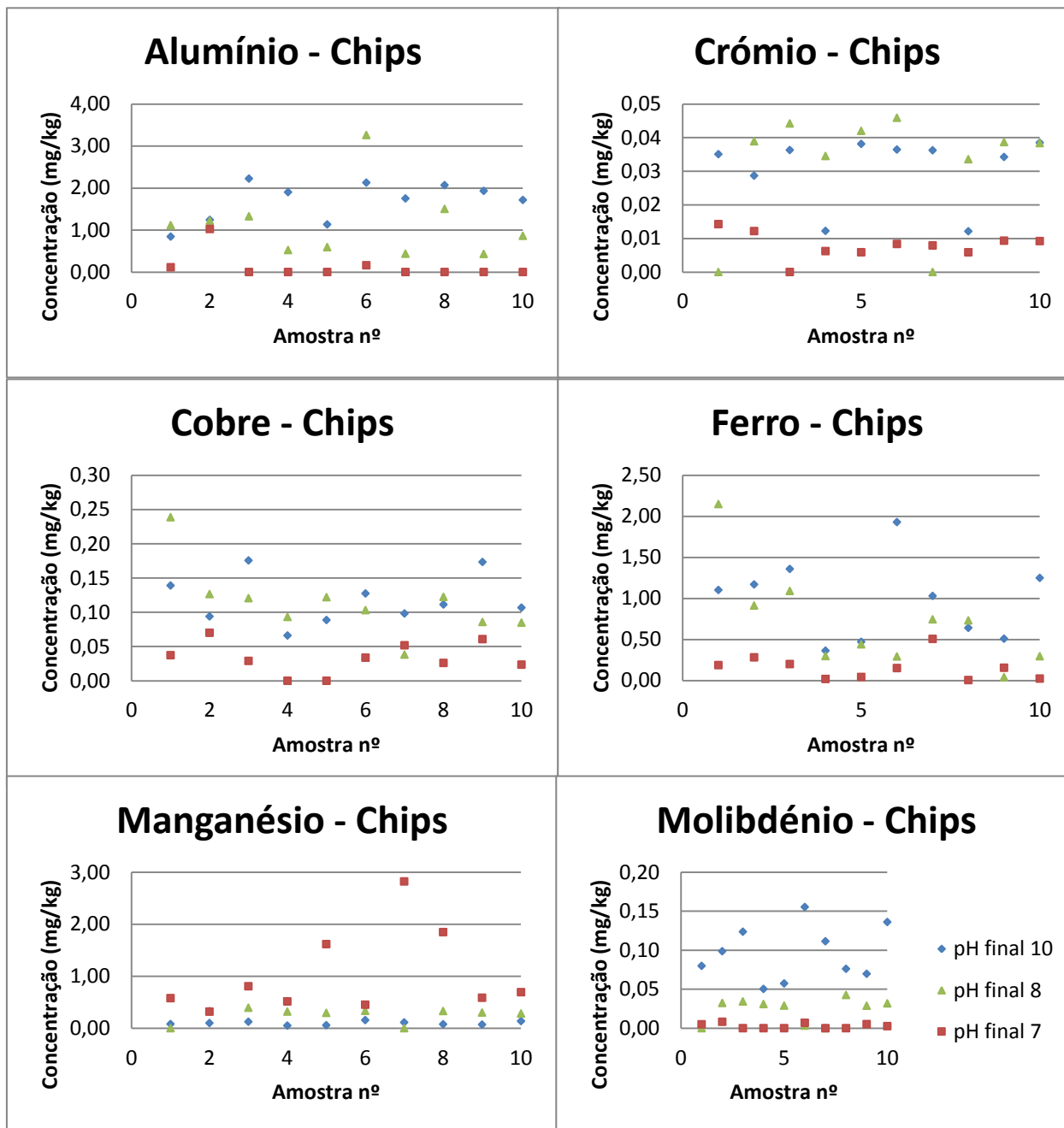
Analisando o quadro 5.5, constata-se que os elementos presentes em maior quantidade na estrutura dos pneus são por ordem decrescente de concentração, o zinco, alumínio, e ferro. Os metais bário e chumbo possuem quantidades semelhantes, seguindo-se o manganésio com uma concentração relativamente inferior. Assim, pode-se concluir que os resultados do primeiro conjunto de ensaios de lixiviação realizados a chips de pneus usados são coerentes, visto que efectivamente os metais presentes em maior concentração nos pneus, são também os que sofrem uma maior lixiviação.

Pressupõe-se, com base nestes resultados que em meio ácido, quase metade da concentração de zinco existente na estrutura dos pneus tenha sofrido lixiviação, sendo este metal o elemento que sofreu uma maior taxa de lixiviação dos elementos analisados. Da mesma forma, pode-se verificar que os elementos que sofreram uma menor lixiviação foram o arsénio, mercúrio, que não sofreram qualquer lixiviação (ou esta foi inferior aos limites de detecção).

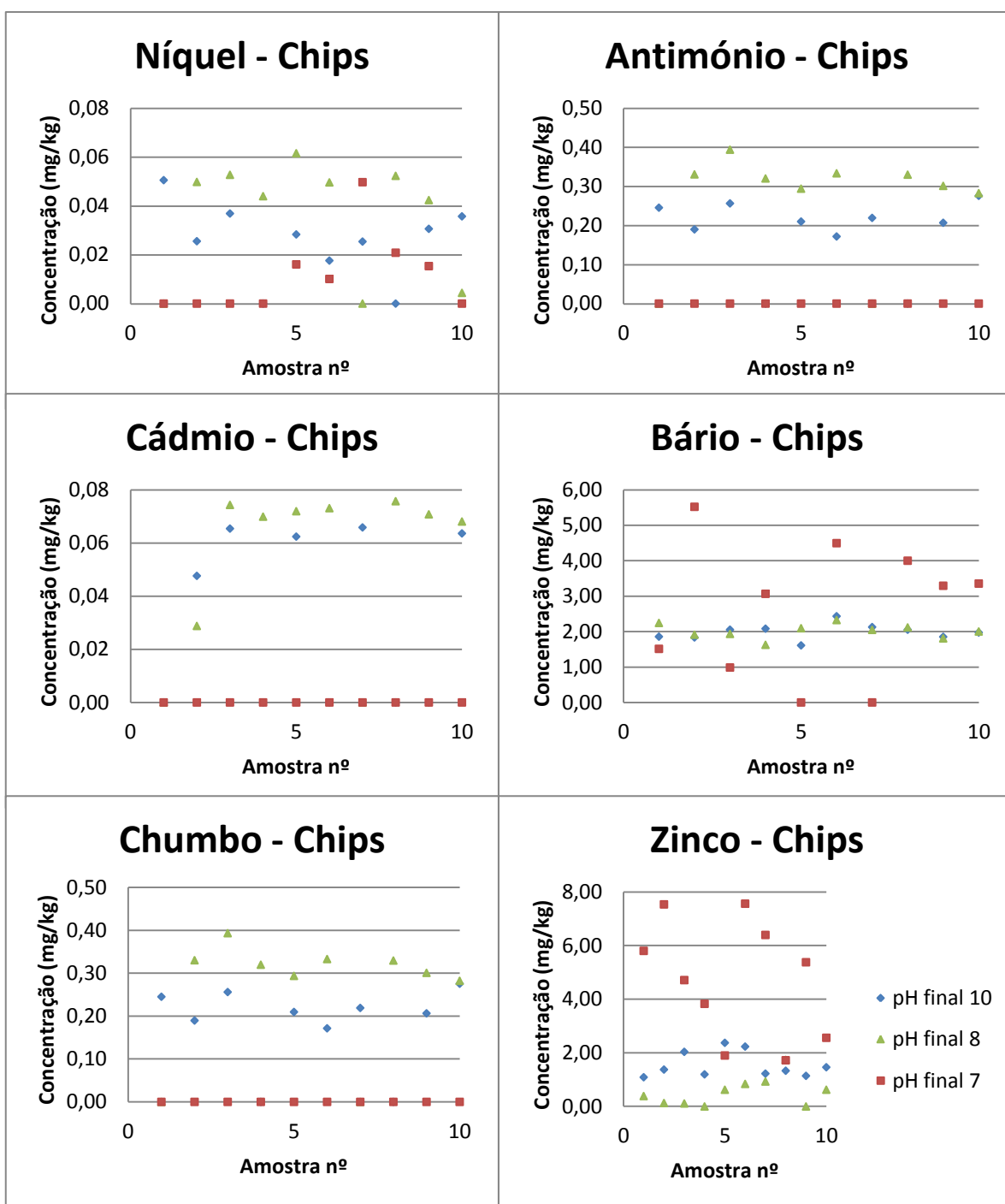
Segundo Quina (2005) o pH é a variável que mais condiciona a solubilidade da maioria dos elementos, especialmente dos metais presentes em quantidades vestigiais. Existem diversos

Capítulo 5 – Apresentação e discussão de resultados estudos que sublinham esta importância (Jing *et al*,2004; van der Sloot e Dijkstra, 2004; Quina, 2005).

Através da realização de gráficos de dispersão, dos elementos analisados nos diferentes valores de pH facilmente se verifica se efectivamente existiu influência do pH nos valores lixiviados.



**Figura 5.1:** Gráficos de dispersão para os elementos Al, Cr, Cu, Fe, Mn e Mo lixiviados em chips de pneus usados.



**Figura 5.2:** Gráficos de dispersão para os elementos Ni, Sb, Cd, Ba, Pb e Zn lixiviados em chips de pneus usados.

Da análise das figuras 5.1 e 5.2 facilmente se verifica que o comportamento dos elementos a pH 7 se distingue do comportamento seguido nos restantes valores de pH testados. Relativamente aos valores de pH final de 8 e 10, em diversos elementos é difícil através dos gráficos verificar se seguem comportamentos distintos.

Assim, de forma a analisar os resultados obtidos para os valores de pH final de 8 e 10, foi utilizado o teste de Krustal-Wallis. Trata-se de um teste apropriado para comparar distribuições de duas ou mais variáveis observadas em duas ou mais amostras independentes (Krustal e

Capítulo 5 – Apresentação e discussão de resultados Wallis, 1952). Desta forma, o teste pode ser usado para testar se duas ou mais amostras provém de uma mesma população ou se de populações diferentes. Ao aplicar-se o teste estatístico no software SPSS, obtém-se níveis de significância ( $p$ ) para cada elemento. Caso este seja superior a 0,05, conclui-se que os comportamentos são semelhantes. Caso o nível de significância seja inferior ou igual a 0,05 conclui-se que as populações apresentam comportamentos distintos. O quadro 5.6 resume os resultados do teste obtidos para os 13 metais detectados.

<b>Metal</b>	<b>Resultado do teste Krustal-Wallis (<math>p</math>)</b>	<b>Comportamento</b>
Al	0,023	Diferente
Ba	0,762	Igual
Cd	0,051	Igual
Cr	0,197	Igual
Cu	0,570	Igual
Fe	0,096	Igual
Mn	0,140	Igual
Mo	0,001	Diferente
Ni	0,049	Igual
Pb	0,015	Diferente
Sb	0,006	Diferente
Zn	0,131	Igual

**Quadro 5.6:** Resultados do teste de Krustal-Wallis, relativo ao comportamento dos metais a valores de pH final 8 e 10.

Através do teste estatístico realizado, verifica-se então que, para os elementos Al, Mo, Pb e Sb, os valores de pH final de 8 e 10 correspondem a comportamentos diferentes. Para os restantes metais (Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn), os dois valores de pH testados não provocam comportamentos diferentes. No entanto, apesar do teste utilizado confirmar que o comportamento dos metais nos valores de pH 8 e 10 são diferentes, as concentrações médias determinadas para os dois meios são bastante semelhantes.

Selbes (2009) efectuou um estudo semelhante ao realizado, onde adicionou NaOH para simular condições básicas (pH 10) e HCl para simular condições ácidas (pH 4). Os ensaios de lixiviação tinham a duração de 28 dias, sendo que de 24 em 24 horas foram retirados pequenos volumes de lixiviado para análise, sendo estes substituídos pelo mesmo volume de água destilada. Nesse momento, era também a acertado o valor de pH com a adição de HCl ou NaOH, para o valor de pH inicial. Este autor realizou este procedimento para diversos

Capítulo 5 – Apresentação e discussão de resultados

tamanhos de chips/ granulados de pneus. Em termos de metais analisados, apenas quatro dos 8 metais analisados são idênticos para os dois estudos (Al, Fe, Mn e Zn). No quadro 5.7, encontram-se alguns dos resultados do estudo de Selbes (2009), ao fim do 1º dia de lixiviação, para chips de pneus com dimensões semelhantes às utilizadas no presente trabalho (60x20mm).

**Quadro 5.7:** Concentrações de metais lixiviados (mg/kg) em diferentes valores de pH, segundo Selbes,2009.

Valores de pH	Al	Fe	Mn	Zn
4	0,36	14,68	0,34	11,98
7	0,08	0,28	0,16	1,64
10	0,64	0,32	0,02	0,34

Comparando os resultados obtidos por Selbes (2009) com os resultados do presente estudo, para os mesmos metais e valores de pH final, verifica-se que para os elementos Al, Mn e Zn, a ordem de grandeza das concentrações é idêntica para os dois estudos. No caso do ferro, observa-se que os valores obtidos no presente estudo são bastante superiores aos valores apresentados por Selbes (2009).

Relativamente ao comportamento dos metais nos diferentes valores de pH testados, verifica-se que o comportamento dos quatro metais foi idêntico nos dois trabalhos realizados. Segundo vários autores (Liu *et al.*,1998; Twin City Testing Corporation, 1990; van der Sloot e Dijkstra, 2004), os elementos catiónicos são maioritariamente lixiviados em meios ácidos, apresentando um perfil em U interrompido, onde os valores mínimos de lixiviação ocorrem em valores de pH entre 8 e 10, e a partir de determinado grau de alcalinidade (pH 12) a lixiviação deixa de se realizar. No presente trabalho verifica-se que, apesar de existirem certos metais que apresentaram um comportamento deste tipo (Ba, Mn e Zn), a maior parte dos elementos catiónicos analisados não apresentou este comportamento típico. O mesmo acontece no trabalho realizado por Selbes (2009), onde se verifica que os elementos Mn e Zn apresentam o comportamento esperado, mas os restantes dois elementos catiónicos (Al e Fe), apresentam comportamentos díspares.

A partir desta análise, pode-se supor que a adição de HCl, pode interferir nos resultados, provocando alterações nos comportamentos de referência apresentados por diversos autores, já que nestes estudos, a obtenção de meios ácidos foi realizada com outros reagentes (e.g ácido nítrico ou ácido acético). De facto, segundo Chang (2005) a adição de HCl, pode provocar a formação de cloretos metálicos, sendo estes mais ou menos solúveis, dependendo esta de diversos factores (e.g disponibilidade dos iões metálicos em solução, carga efectiva dos iões). O autor refere, por exemplo, que a adição de HCl a uma solução que possua iões



Capítulo 5 – Apresentação e discussão de resultados

$Pb^{2+}$ , produz a formação de um precipitado de  $PbCl_2$  (Cloreto de chumbo) praticamente insolúvel. Este facto confirma os resultados obtidos no presente trabalho, onde, ao contrário do que seria expectável, o metal chumbo não foi detectado em nenhuma das amostras de chips de pneus usados e brita calcária, que sofreu adição inicial de HCl (pH final 7).

Relativamente aos elementos aniónicos, segundo van der Sloot e Dijkstra (2004), a lixiviação máxima ocorre entre valores de pH 8 e 10, sendo que ao diminuirmos o pH, a lixiviação também diminui gradualmente. Analisando os elementos aniónicos determinados no presente trabalho (Mo e Sb), verifica-se que efectivamente os valores de concentração para o meio ligeiramente ácido (pH final 7), foram inferiores aos valores determinados para os dois meios alcalinos (valores de pH final 8 e 10).

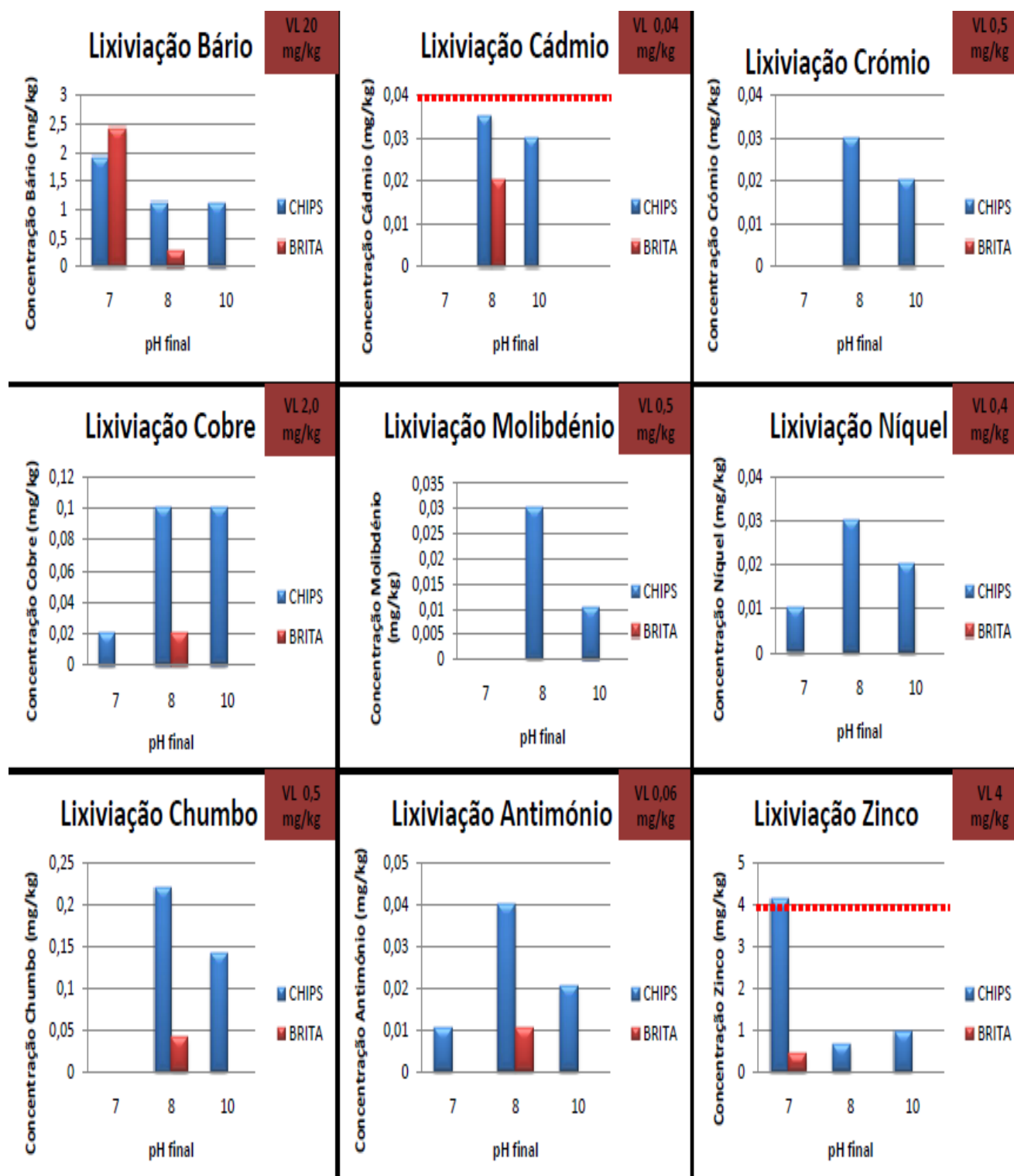
Fazendo a comparação dos valores obtidos nos ensaios de lixiviação realizados, com os valores limites estabelecidos no DL n.º 183/2009, de 2009, verificamos se efectivamente os chips podem ser utilizados como sistema de drenagem de cobertura final em aterros sanitários. Visto que o objectivo não consiste na deposição de chips de pneus em aterro, mas sim a sua utilização na constituição da infra-estrutura, considerou-se relevante fazer a comparação entre os valores obtidos, e os valores estabelecidos pelo DL n.º 183/2009 para resíduos inertes, que se encontram no quadro 5.8.

**Quadro 5.8:** valores limites de lixiviação para resíduos inertes, segundo DL n.º. 183/2009

<b>Metal</b>	<b>mg/kg de matéria seca L/S (*) = 10 l/kg</b>
As	0,5
Ba	20
Cd	0,04
Cr total	0,5
Cu	2
Hg	0,01
Mo	0,5
Ni	0,4
Pb	0,5
Sb	0,06
Se	0,1
Zn	4

(\*) Relação líquido para sólido para libertação total.

Da análise dos resultados obtidos para amostras de brita calcária, verifica-se que os valores obtidos são bastante inferiores aos valores limite estabelecidos para este tipo de resíduos. Relativamente aos resultados obtidos para as amostras de chips de pneus usados, verifica-se que existem valores bastante próximos dos limites estabelecidos. A figura 5.4 permite uma melhor comparação entre tipo de amostras, e clarifica quais os elementos críticos.



**Figura 5.3:** Resultados obtidos para os parâmetros presentes no DL n°. 183/2009, com respectivos valores-limite legislados para resíduos inertes.

Analisando os gráficos anteriores verifica-se que praticamente todos os metais determinados encontram-se em concentrações muito distantes dos valores limites legislados, exceptuando os metais cádmio e antimónio em amostras de chips de pneus, em que as concentrações determinadas se encontram relativamente próximas do valor limite legislado.

No entanto, verifica-se que, para os chips de pneus usados, os valores detectados de zinco em meio ácido, são superiores ao legislado. Verifica-se também, que à excepção do bário em meio ácido, os chips de pneus são efectivamente o material que possui uma maior concentração de metais lixiviados.

Assim, o zinco foi novamente determinado em concentrações em meio ácido. Desta repetição concluiu-se que existia uma contaminação nos dois brancos utilizados bastante elevada (cerca de 0,7 mg/L), ficando por isso o ensaio sem efeito, devido à impossibilidade de quantificar a contaminação (valores das amostras inferiores ao determinado nos brancos).

## **5.2 Resultados da análise de amostras de águas pluviais – aterro**

### **Amarsul**

---

No quadro 5.9 encontram-se resumidas as concentrações de metais obtidas (em mg/L) para as águas pluviais retiradas nos dois depósitos em análise, nos diferentes dias de recolha. Encontram-se apresentadas apenas as concentrações dos elementos metálicos que foram detectados.

Da análise dos resultados verificamos que, dos 15 elementos analisados, apenas sete foram detectados. No caso das águas pluviais recolhidas do depósito da célula constituída por chips de pneus usados, apenas foram detectados os elementos alumínio, bário, ferro, manganésio e zinco. No caso das águas pluviais recolhidas no depósito da célula constituída por brita calcária foram ainda encontrados os elementos cobre e molibdénio, cada um destes em apenas uma das cinco recolhas efectuadas.

**Quadro 5.9:** Concentrações de metais obtidas para as águas pluviais analisadas (mg/L).

Data	Chips de pneus usados					Brita Calcária						
	Al	Ba	Fe	Mn	Zn	Al	Ba	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
04/11	0,056	0,280	0,205	n.d	0,083	n.d	0,479	n.d	1,610	0,036	0,012	0,134
09/12	0,070	0,388	1,047	1,175	0,152	0,098	0,437	n.d	2,260	1,695	n.d	0,167
29/12	0,029	0,279	0,121	0,914	0,010	0,054	0,219	0,027	0,634	1,544	n.d	0,178
07/01	0,018	0,264	6,559	1,060	0,135	n.d	0,247	n.d	15,38	1,383	n.d	0,130
28/01	n.d	0,360	0,058	0,510	0,189	0,086	0,445	n.d	0,103	0,045	n.d	0,248

Comparando as concentrações determinados para as águas pluviais recolhidas nos dois depósitos, verifica-se que o alumínio foi o único elemento em que a concentração foi superior para o depósito da célula construída com chips de pneus usados, para todas as datas de recolha. No caso dos metais bário, manganésio e zinco, as concentrações determinadas foram semelhantes para os dois depósitos mas ligeiramente superiores nas águas pluviais recolhidas no depósito da célula construída com brita calcária. As concentrações de ferro foram, em todas as datas de recolha superiores nas águas pluviais recolhidas no depósito da célula construída com brita calcária.

Para verificar se efectivamente as concentrações obtidas nos dois reservatórios representam comportamentos diferentes, foi também feito o teste de Krustal-Wallis para os elementos detectados (quadro 5.10).

Assim, confirma-se que não existem diferenças estatisticamente significativas entre a libertação de metais nos sistemas de drenagem construídos com chips de pneus ou com brita calcária. Pode-se então afirmar que, apesar das diferenças de comportamentos evidenciadas em meio laboratorial, onde, exceptuando o bário, a lixiviação foi superior nos chips de pneus usados, em contexto real o mesmo não se verifica.

**Quadro 5.10:** Resultados do teste de Krustal-Wallis, relativo ao comportamento dos metais existentes nas águas pluviais recolhidas dos dois depósitos.

Elemento	Resultado do teste Krustal-Wallis	Comportamento
Al	0,751	Igual
Ba	0,602	Igual
Cu	0,096	Igual
Fe	0,347	Igual
Mn	0,387	Igual
Mo	0,068	Igual
Zn	0,472	Igual

## **CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS**

---



## Capítulo 6 - Considerações Finais

---

Tendo em conta que a utilização de pneus usados em diversas aplicações de engenharia civil e geotécnica são cada vez mais uma prática, considerou-se relevante analisar a perigosidade associada à utilização deste tipo de material como substituto de material drenante em sistemas de drenagem de aterros sanitários. Para isso foram feitas análises de metais pesados a chips de pneus usados e brita calcária (material normalmente utilizado em camadas drenantes), tanto em meio laboratorial como em contexto real, de forma a verificar não só as implicações da utilização de chips de pneus usados, como fazer uma comparação entre os dois tipos de materiais.

Assim, em meio laboratorial foram feitos ensaios de lixiviação, como forma de simulação das condições a que os chips de pneus estão habitualmente sujeitos neste tipo de aplicação, onde entram em contacto com águas pluviais. Da mesma forma, foram realizados ensaios em valores extremos de pH, de forma a verificar o comportamento deste material em situações adversas. O mesmo procedimento foi realizado para amostras de brita calcária.

Da análise completa dos resultados obtidos, é importante realçar que o pH sofreu uma grande variação nos meios ácido e natural, não tendo estes resultados obtido a representatividade desejada (analisar situações extremas de acidez). De facto, para os ensaios realizados com chips de pneus usados, o meio só se manteve com valores ácidos durante duas das 24 horas de duração da lixiviação, enquanto que nos ensaios realizados em meio natural, o meio alcalino é alcançado entre as 6 e as 24 horas. Porém, importa referir que tal variação deve-se provavelmente aos constituintes do material utilizado (brita calcária e chips de pneus usados) e não aos reagentes utilizados, já que o pH nos brancos não sofreu variação ao longo da duração do ensaio.

Apesar de os meios de pH utilizados não constituírem a representatividade desejada, verificou-se que existem diferenças significativas de comportamento dos metais no meio ácido (pH final 7) e nos restantes dois meios testados. Para estes dois últimos meios, a maioria dos metais revelou comportamentos iguais, sendo que apenas os elementos Al, Mo, Pb e Sb manifestaram comportamentos diferentes. Apesar disso, os elementos catiónicos, com excepção do Ba, Zn e Mn não demonstraram o tipo de comportamento descrito por outros autores (Liu *et al.*, 1998; van der Sloot e Dijkstra, 2004; Twin City Corporation, 1990), em que as concentrações lixiviadas deveriam diminuir com o aumento gradual do pH. Tal dever-se-á à utilização de HCl, que segundo Chang (2005), na presença de elementos metálicos em solução, provoca a formação de cloretos mais ou menos solúveis. Este facto pode explicar as concentrações inferiores de metais catiónicos em meio ácido (onde houve



adição de HCl) ou até a sua inexistência (como é o caso do metal Pb). Já para os elementos aniônicos (Mo e Sb), estes apresentaram um comportamento semelhante ao descrito por outros autores, tendo obtido valores mínimos de lixiviação no meio a pH final 7, e valores superiores a pH final 8 e 10.

Relativamente aos resultados obtidos de concentrações dos metais analisados, os valores médios obtidos são pouco representativos, sendo estes bastante dispersos. Apesar disso, pode-se concluir que a utilização de chips de pneus usados como constituintes de sistemas de drenagem não apresenta perigo em relação aos elementos arsénio, mercúrio e selénio, visto que estes não foram detectados em nenhuma das amostras, para nenhum dos meios.

Os elementos mais lixiviados pelos chips de pneus usados em meio laboratorial foram o ferro, bário, zinco, alumínio e manganésio. Estes são resultados similares aos relatados por diversos autores (e.g. Aydilek *et al.*, 2006; Rowe e McIsaac, 2005; Young *et al.*, 2003; Humphrey e Katz, 2001), ainda que tenham sido estudos efectuados em circunstâncias distintas (tipo de ensaio, relação L/S, duração) e não ser possível a comparação dos seus valores.

Concluiu-se do conjunto dos 15 elementos metálicos analisados (arsénio, bário, cádmio, crómio, cobre, mercúrio, molibdénio, níquel, chumbo, antimónio, selénio, zinco, alumínio, ferro e manganésio) que o único elemento problemático na lixiviação de chips de pneus usados poderá ser o zinco. De facto, os resultados para o zinco em meio ácido foram superiores ao valor limite legislado no DL n.º 183/2009. Não foi possível verificar os resultados obtidos, visto que para o segundo conjunto de amostras preparado, existia uma contaminação significativa de zinco nos brancos.

Assim, comparando os resultados obtidos com os valores limite de lixiviação estabelecidos no DL n.º 183/2009, quer a brita calcária quer os chips de pneus podem ser considerados como resíduos inertes, visto, em condições normais, os resultados obtidos serem inferiores aos valores estabelecidos.

Em contexto real, foram recolhidas águas pluviais no aterro da Amarsul em Palmela, onde os dois tipos de material estudados fazem parte de sistemas de drenagem de águas pluviais diferentes. Durante três meses, foram recolhidas um total de cinco amostras para cada tipo de material. Para as águas pluviais verifica-se que, ao contrário do que seria previsível, a partir dos resultados obtidos em laboratório, apenas 7 dos 15 elementos analisados (Al, Ba, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn), foram detectados, em concentrações semelhantes para os dois tipos de material (chips de pneus usados e brita calcária). Pode-se afirmar então, que efectivamente, os chips de pneus poderão constituir uma alternativa à aplicação da brita calcária, promovendo-se desta forma a valorização de um resíduo e a poupança de um recurso natural.

Assim, como propostas de trabalho futuro sugere-se a realização de ensaios de lixiviação em que o pH seja medido e corrigido ao longo da sua duração, de forma a simular condições extremas de acidez. Recomenda-se também um estudo prévio de qual o reagente a utilizar, para acidificação das amostras. Esta escolha deve ter em conta, factores como reacções secundárias indesejadas e a sua utilização em trabalhos já realizados, de modo a permitir uma melhor comparação de resultados.

Poderão também ser efectuados estudos de lixiviação analisando outro tipo de elementos constituintes de pneus (e.g. compostos orgânicos), à escala laboratorial, de forma a obtermos um maior conhecimento da real perigosidade deste tipo de material.

Propõe-se ainda a continuação da análise de águas pluviais recolhidas no aterro da Amarsul, em Palmela, de forma a obter resultados para períodos mais longos, e por isso mais fidedignos. Da mesma forma, sugere-se também a determinação de outros parâmetros, de forma a verificar a qualidade destas águas.

Por último, e tendo como base a conclusão de que em contexto real, a utilização de chips de pneus usados ou brita calcária em sistemas de drenagem não manifesta diferenças significativas, recomenda-se a realização de um estudo de viabilidade económica da utilização de chips de pneus usados em sistemas de drenagem, face à utilização comum da brita, ou de outro recurso natural.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---



## Referências Bibliográficas

- Amaral, J., Canas, A., Correia, M., Ladeira, S., Ferrão, P., Lagos, P., Olim, M. e Reis, C. (2000). *A Ecologia Industrial e o Automóvel em Portugal*. 1ª edição, Celta Editora. Oeiras, Portugal.
- Amarsul (2010a). *Onde estamos*. Acedido em 22 de Julho de 2010 em: <http://www.amarsul.pt/localizacoes.php>.
- Amarsul (2010b). *Quem Somos*. Acedido em 22 de Julho de 2010 em: [http://www.amarsul.pt/quem\\_somos.php](http://www.amarsul.pt/quem_somos.php).
- APA – Agência Portuguesa do Ambiente (2008). *Dossier Temático – Prevenção de Resíduos – Tema 6: Pneus Usados*. Acedido em 18 de Junho de 2010 em: <http://www.apambiente.pt>.
- Atech Group (2001). *A National Approach to Waste Tyre*. Commonwealth Department of Environment, Australia.
- Aydilek, A., Madden, E. e Demirkan, M. (2006). Field Evaluation of a Leachate Collection System Constructed with Scrap Tires. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **132**(8):990-1000.
- Barkerlemer Engineering Consultants (2005). *Scrap Tire Workshop – Construction Applications for Landfills*. West des Moines, EUA.
- Blackcircles (2010). *The History of the Tyre*. Acedido a 16 de Junho de 2010 em: <http://www.blackcircles.com/general/history>.
- Bocca, B., Forte, G., Petrucci, F., Costantini, S. e Izzo, P. (2009) Metals contained and leached from rubber granulates used in synthetic turf areas. *Science of the Total Environment*, **407** (7): 2183-2190.
- Braga de Carvalho, G.M. (2007). *Contabilidade Ambiental – Teórica e Prática*. 1ª Edição, Juruá Editora. Curitiba, Brasil.

- Brazil Tires Lda. (2010). *Saiba tudo sobre pneus*. Acedido a 22 de Abril de 2010 em: <http://www.braziltires.com.br/novo/noticias/pneus.html>.
- Bridgestone (2010). *Tyre manufacturing process*. Acedido a 15 de Junho de 2010 em <http://www.bridgestone.com>.
- Brito, M.C.F. (2009). *Análise de pavimentos de parques infantis feitos com granulados de pneus usados – Avaliação do potencial risco para a saúde das crianças*. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente, perfil Engenharia Sanitária. Faculdade de Ciências e Tecnologias – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. 139 pp.
- Brophy, M., Graney, J.R. (2004). Groundwater effects from highway tire shred use. *Environmental Forensics*, **5**: 79-84.
- Cabeças, A. e Dores, R. (2008). *Aplicação de Chips de Pneus em Camadas de Drenagem*, Encontro Nacional de Saneamento Básico (ENASB). Associação Portuguesa para Estudos de Saneamento Básico (APESB), Covilhã.
- Campos, P. S. (2006). *Aproveitamento Industrial da Borracha Reciclada de Pneus Usados (a reciclagem do resíduo 100103 da L.E.R.)*. Tese de Mestrado em Gestão Ambiental. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães. 157 pp.
- Cauduro, F. e Roberto, S. (2002). *Avaliação comparativa de testes de lixiviação de resíduos sólidos*. XXVIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Cancún, México.
- Conner, J.R.(1990). *Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes*. 1ª Edição, Van Nostrand Reinhold. New York, USA.
- Dw-world (2010). *Calendário Histórico – 1845: Patenteado o primeiro pneu*. Acedido a 16 de Junho de 2010 em <http://www.dw-world.de/dw/article/0,,686295,00.html>
- Edeskar, T. (2004). *Technical and Environmental Properties of Tyre Shreds Focusing on Ground Engineering Applications*. Lulea University of Technology, Department of Civil and Mining Engineering – Division of Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- Edil, T., Park, J. e Kim, J. (2004). Effectiveness of Scrap Tires as Sorptive Drainage Material, *Journal of Environmental Engineering*, **130**(7): 824-831

EN 12457/4 – Lixiviação – Ensaio de Conformidade de lixiviação de Materiais de Resíduos Granulares e de Lamas

EGF (2007). *Projecto de Aplicação de Chips de Pneus na Camada de Encerramento do AS de Palmela*, EGF – Empresa Geral do Fomento.

EPA - Environmental Protection Agency (1991). *Markets for scrap tires*. Acedido a 23 de Julho de 2010 em: <http://www.epa.gov/osw/conservation/materials/tires/tires.pdf>.

EPA - Environmental Protection Agency (2008). Civil Engineering applications – Scrap Tires. Acedido a 23 de Julho de 2010 em [http://www.epa.gov/osw/conservation/materials/tires/civil\\_eng.htm](http://www.epa.gov/osw/conservation/materials/tires/civil_eng.htm).

ETRMA - European Type & Rubber Manufacturers Association (2010). *Activities*. Acedido a 28 de Abril de 2010 em: <http://www.etrma.org/default.asp>.

General Tire (2010). The History of Tires. Acedido a 16 de Junho de 2010 em <http://www.generaltire.com/university/history.php>.

GeoSyntec Consultants, Inc. (2008). *Guidance Manual for Engineering Uses of Scrap Tires*, Maryland Department of the Environment's Scrap Tire Program, Columbia.

Gomes, A.M.V. (2009). *Chips de pneus – substituto de material britado em aterros*. Tese de Mestrado em Engenharia Sanitária. Faculdade de Ciências e Tecnologias – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. 142pp.

Grimes, B., Steinbeck, S., Amoozegar, A. (2003). Analysis of Tire Chips as a Substitute for Stone Aggregate in Nitrification Trenches of On-site Septic Systems. *Small Flows Quarterly*, 4(4).

HDR Engineering (1997). *Tire chip utilization study – Landfill applications*. Nebraska Department of Environmental Quality. Nebraska, EUA.

Humphrey, D.N. e Katz, L.E. (2001). *Field study of water quality effects of tire shreds placed below the water table*. Proceedings of the Conference on Beneficial Use of Recycled Materials in Transportation Applications, Air and Waste Management Association, Pittsburgh, PA.



- Humphrey, D. (2005). *Tire Derived Aggregate – A lyh mNew Road Building Material – Barriers and Opportunities*, Presented in Recycled Materials in Road and Airfield Pavement.
- INETI – Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (2000). *Guia Técnico, Sector da Fabricação de Artigos de Borracha*. Acedido a 20 de Maio de 2010 em: [http://netresiduos.trace.pt/resources/docs/guias\\_sectoriais/fabricacao\\_borracha/sectorfabricacaoartigosborrachapdf](http://netresiduos.trace.pt/resources/docs/guias_sectoriais/fabricacao_borracha/sectorfabricacaoartigosborrachapdf).
- Jang, J., Yoo, T., Oh, J. e Iwasaki, I.(1997). Discarded tire recycling practices in the United States, Japan and Korea. *Resources, conservation and recycling*, **22**:1-14.
- Kassim, T., Simoneit, B., Williamson, K. (2005). Recycling Solid Wastes as Road Construction Materials: An Environmentally Sustainable Approach. *Handbook of Environmental Chemistry* **5F** (1):59-181.
- Khorami, M. Ganjian, E., Vafaie, A. (2007). *Mechanical properties of replacing coarse aggregate with waste tire rubbers in concrete*. International conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Coventry University, Proceedings of Special Sessions, pp. 85-90, 11th – 13th June 2007.
- Krömer, S., Kreipe, E., Reichenback, D., Stark, R. (1999). *Life Cycle Assessment of a Car Tire*. Acedido a 29 de Julho de 2010 em: [http://contionline.com/generator/www/com/en/continental/portal/themes/esh/life\\_cycle\\_assessments\\_en/download/life\\_cycle\\_assessment\\_en.pdf](http://contionline.com/generator/www/com/en/continental/portal/themes/esh/life_cycle_assessments_en/download/life_cycle_assessment_en.pdf)
- Kruskal, W. H., Wallis, W. A., 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of American Statistical Association* **47**: 583–621.
- Levy, J. e Cabeças, A. (2006). *Resíduos Sólidos Urbanos – Princípios e Processos*. 1ªedição, AEPSA – Associação das Empresas Portuguesas para o Sector do Ambiente. Lisboa, Portugal.
- Liu, H., Mead, J. e Stacer, R. (1998). *Technical Report #2 Environmental Impacts of Recycled Rubber in Light Fill Applications: Summary and Evaluation of Existing Literature*, Chelsea Center for Recycling and Economic Development – Plastics Conversion Project. University of Massachusetts Lowell, EUA.

- Lopes, M.(2002). Estudo do Comportamento de Metais Pesados na Combustão de Lamas Residuais Urbanas em Leito Fluidizado. Tese de Doutorado em Engenharia do Ambiente, Especialidade de Sistemas Naturais e suas tensões. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. 275 pp.
- Mclsaac, R. e Rowe,R. (2005). Clogging of Tire Shreds and Gravel Permeated with Landfill Leachate. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**(6): 682-693.
- Melchior, S., Berger, K., Vielhaber, B. e Miehlich, G. (1993). *Comparison of the effectiveness of different liner systems for top cover*. Proceedings of Sardinia 93 - 4th Int. Landfill Symposium, Cagliari, Vol. 1, pp. 225 - 234.
- Mello, L., Impe, W., Lundgren,T., Herstus, J., Mawlawi, F., Floess, C., Hachich, W., Gonçalves, H. e Boscov, M. (1998). Assessment of geoenvironmental hazards from non traditional geotechnical construction materials. *Environmental Geotechnics*, **3**:1075–1100.
- Michelin (2010). *O pneu radial*. Acedido a 16 de Junho de 2010 em <http://www.michelintransport.com/ple/front/affich.jsp?codeRubrique=33&lang=PT>.
- Maldonado, L. (2009). *Incêndio na Recipneu*. Acedido a 20 de Abril de 2009 em: <http://estacaodesines.blogspot.com/2009/03/incendio-na-recipneu.html>
- Mota, H. I, Gomes, J.F.P., Bordado, J.C.M., Pereira, M.M.C., Felisberto, G.M.S., Ribeiro, A., Pampulim, V.M., Veloso, I., Custódio, M.L.B (2009). Coated rubber granulates obtained from used tyres for use in sport facilities: A toxicological assessment. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, **21** (3-4): 26-30.
- Nelson, S., Mueller, G. e Hemphill, D.(1994). Identification of tyre leachate toxicants and a risk assessment of water quality effects using tyre reefs and canals. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, **52**(4): 574-581.
- OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development (2006). *Improving Recycling Markets*. Paris, França. 186 pp.

- Quina, M. M. J. (2005). Processos de Valorização e Inertização de Cinzas Volantes – Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos. Tese de Doutoramento em Engenharia Química. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra 423 pp.
- Recipneu (2010a). *Produtos – Aplicações*. Acedido a 21 de Abril de 2010 em: <http://www.recipneu.com/artigo.aspx?cntx=byJ9I2HLAah%2FNVycSVYDBfaPg101dANNQKzBwNZkGTzqALv3UpEc2TMNTtW7hhBx>.
- Recipneu (2010b). *A empresa – Descrição*. Acedido a 21 de Abril de 2010 em: <http://www.recipneu.com/artigo.aspx?Cntx=blHyAkxoR%2BxXJW8kUxBPKk1Q74tJseSJDS0C5VmkAyWEYhT87IXUvB%2BfK23XnazP>.
- Recipneu (2010c). *A empresa – Tecnologia*. Acedido a 22 de Abril de 2010 em: <http://www.recipneu.com/artigo.aspx?cntx=e%2BPnm9OfCCZ5D0m1McHrM24payTbloxHu%2FOMrAQB36m%2B59srzuga0Cb5BIFHx%2FHY>.
- Recipneu (2010d). *MADRE® material agregado derivado de resíduos – especificações técnicas*.
- Reddy, K., Marella, A.(2001). *Properties of different size scrap tires shreds: implications on using as drainage material in landfill cover systems* , The Seventeenth International Conference on Solid Waste Technology and Management Philadelphia, PA, USA, pp.119.
- Rocca, A.; Iacovone, A.; Barrotti, A. (1993). *Resíduos sólidos industriais*. 2ª edição, CETESB. São Paulo, Brasil.
- Roque, A. e Cabeças, A. (2009). *Valorização das lamas das Estações de Tratamento de Água para Consumo Humano em Obras Geotécnicas*, Actas do Seminário de Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas – Caracterização e Medidas para o Desenvolvimento do Sector, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Russo, M.A.T. (2005). Avaliação dos processos de transformação de resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Escola de Engenharia – Universidade do Minho, Guimarães, 320 pp.

- Salgado, R., Yoon, S., Siddiki, N. (2003). *Final Report – Construction of Tire Shreds Test Embankment*, Indiana Department of Transportation, Purdue University West Lafayette, Indiana, USA.
- San Miguel, G., Fowler, G. e Sollars, C. (2002). The leaching of inorganic species from activated carbons produced from waste tyre rubber. *Water Research*, **36**:1939-1946.
- Selbes, M. (2009). *Leaching of dissolved organic carbon and selected inorganic constituents from scrap tires*. A Thesis Presented In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science Environmental Engineering and Science. Graduate School of Clemson University. Clemson, USA.
- Silva, T., Lange, L., Tello, C., Teixeira, L. (2002). *Estudo Comparativo de normas de lixiviação aplicadas a resíduos perigosos solidificados/estabilizados em cimento*. 28º Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México.
- SDAB - Svensk Dackatervinning AB (1994). *Life Cycle assessment*. Acedido a 30 de Julho de 2010 em: [http://www.sdab.se/pdf/used\\_tyres.pdf](http://www.sdab.se/pdf/used_tyres.pdf).
- SDAB - Svensk Dackatervinning AB (2007). *Recycled Tyres – material with a great potencial*. Acedido a 30 de Julho de 2010 em: <http://www.sdab.se>.
- Shulman, V.L. (2004). *Tyre Recycling*. 1ª edição, RAPRA Techonology Ltd. Shropshire, Reino Unido.
- Twin City Corporation (1990). Study of waste tires for roadbed fill. *Scrap Tire News* **4**(5).
- UNEP - United Nations Environment Programme (1999) *Basel Convention, Technical Guidelines on hazardous wastes: Identification and management of used tyres*. Basel Convention Series/SBC N. ° 99/008 Geneva.
- UNEP - United Nations Environment Programme (2008). *Revised technical guidelines on environmentally sound management of used tyres*. Conference of the Parties to the Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal Ninth meeting. Acedido a 5 de Maio de 2010 em: [http://www.unon.org/confss/doc/unep/chw/chw\\_09/CHW\\_9\\_18/K0840329.pdf](http://www.unon.org/confss/doc/unep/chw/chw_09/CHW_9_18/K0840329.pdf)

- Valorpneu (2010a). *Relatório anual e Contas 2009*. Acedido a 10 de Agosto de 2010 em: [http://valorpneu.webuild.pt/output\\_efile.aspx?sid=1e218166-327e-49f2-8c69-36d1ff10e296&cntx=leJXrhFWGLaZjKBmJnD5kH5dyOwdzLMBtHOZ7LCeYQsd%2FOaikxuQ4UCZ5wV1uP1XlIDqo0UXX6TafRysWzPKrQ%3D%3D&idf=690](http://valorpneu.webuild.pt/output_efile.aspx?sid=1e218166-327e-49f2-8c69-36d1ff10e296&cntx=leJXrhFWGLaZjKBmJnD5kH5dyOwdzLMBtHOZ7LCeYQsd%2FOaikxuQ4UCZ5wV1uP1XlIDqo0UXX6TafRysWzPKrQ%3D%3D&idf=690).
- Valorpneu (2010b). *Componentes e Características de um Pneu*. Acedido a 20 de Abril de 2010 em: <http://www.valorpneu.pt>.
- Valorpneu (2010c). *Soluções para pneus usados*. Acedido a 20 de Abril de 2010 em: <http://www.valorpneu.pt>.
- Valorpneu (2010d). *Conheça o sistema SGPU*. Acedido a 20 de Junho de 2010 em: <http://www.valorpneu.pt>.
- Van der Sloot H.A. e Dijkstra J.J. (2004). *Development of Horizontally Standardized Leaching Tests for Construction Materials: A Material Based or Release Based Approach - Identical leaching mechanisms for different leaching materials*.
- WBCSD - World Business Council on Sustainable Development (2008a). *State of Knowledge Report for Tire Materials and Tire Wear Particles*. Acedido a 20 de Junho de 2010 em: <http://www.wbcسد.org/web/projects/tire/SoKreportfinal.pdf>.
- WBCSD – World Business Council on Sustainable Development (2008b). *Managing End-of-Life tires: full report*. Acedido a 22 de Junho de 2010 em: [http://www.wbcسد.org/DocRoot/IBTHZFGcpBK5OxTDXlpS/EndOfLifeTires\\_171208.pdf](http://www.wbcسد.org/DocRoot/IBTHZFGcpBK5OxTDXlpS/EndOfLifeTires_171208.pdf).
- Wik A. e Dave G. (2006) Acute toxicity of leachates of tire wear material to *Daphnia magna*-variability and toxic components. *Chemosphere* **64**:1777–1784.
- Williams, P. (2005). *Waste Treatment and Disposal*. 2ª Edição, John Wiley & Sons. Reino Unido.
- Yoon, S., Prezzi, M. Siddiki, N.Z. e Kim, B. (2005). Construction of a test embankment using a sand-tire shred mixture as fill material. *Waste Management*, **26**:1033-1044.

## ANEXOS

---



## ANEXO I – RESULTADOS GLOBAIS DOS ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO LABORATORIAIS

**Quadro A.1.1:** Resultados globais do ensaio com chips, realizado em meio ácido.

A.	Massa (g)	Volume (ml)	pH(0)	pH(24)
1	102,79	1028	3,69	6,54
2	101,48	1015	3,68	6,69
3	98,77	988	3,67	6,79
4	102,56	1026	3,72	6,97
5	100,66	1007	3,71	6,91
6	100,34	1003	3,67	6,84
7	98,55	986	3,69	6,76
8	99,63	996	3,75	6,79
9	101,32	1013	3,79	6,88
10	99,72	997	3,8	6,86
BR1	----	1000	3,73	3,76
BR2	----	1000	3,72	3,74

**Quadro A.1.2:** Resultados globais do ensaio com chips, realizado em meio natural.

A.	Massa (g)	Volume (ml)	pH(0)	pH(24)
1	99,35	994	5,92	6,58
2	101,35	1014	5,94	6,67
3	98,12	981	5,85	6,7
4	103,18	1032	5,93	6,49
5	98,94	989	5,9	6,55
6	97,4	974	5,89	6,72
7	104,19	1042	5,98	6,51
8	100,52	1005	5,99	6,82
9	98,71	987	5,88	6,43
10	101,45	1015	6	6,69
BR1	----	1000	5,96	5,99
BR2	----	1000	5,82	5,84

A. – amostra; BR - branco



**Quadro A.1.3:** Resultados globais do ensaio com chips, realizado em meio básico.

A.	Massa (g)	Volume (ml)	pH(0)	pH(24)
1	104,46	1045	9,75	9,65
2	104,15	1042	9,84	9,71
3	101,42	1014	9,89	9,81
4	104,61	1046	9,75	10,01
5	100,35	1004	9,95	9,87
6	103,9	1039	9,83	9,75
7	99,42	994	9,77	9,83
8	103,98	1040	9,73	9,84
9	103,34	1033	9,75	9,69
10	101,54	1015	9,76	9,74
BR1	----	1000	9,75	9,77
BR2	----	1000	9,73	9,71

A. – amostra; BR - branco

**Quadro A.1.4:** Resultados globais do ensaio com brita calcária, realizado em meio ácido.

A.	Massa (g)	Volume (ml)	pH(0)	pH(24)
1	100,81	1008	3,62	8,25
2	100,68	1007	3,74	8,19
3	99,55	996	3,69	8,28
4	100,45	1005	3,73	8,21
5	99,95	996	3,65	8,2
6	100,22	1002	3,63	7,99
7	99,4	994	3,74	8,06
8	99,55	996	3,61	8,23
9	100,25	1003	3,66	8,15
10	100,04	1000	3,68	8,12
BR1	----	1000	3,6	3,58
BR2	----	1000	3,62	3,63

A. – amostra; BR - branco

**Quadro A.1.5:** Resultados Globais do ensaio com brita calcária realizado em meio natural.

A.	Massa (g)	Volume (ml)	pH(0)	pH(24)
1	100,53	1005	9,48	9,9
2	100,67	1007	9,7	9,9
3	100,26	1003	9,5	9,91
4	100,08	1000	9,81	9,88
5	100,42	1004	9,74	9,88
6	100,12	1001	9,71	9,89
7	99,9	999	9,73	9,9
8	100,69	1007	9,84	9,9
9	100,16	1002	9,88	9,94
10	100,41	1004	9,89	9,89
BR1	----	1000	5,39	5,68
BR2	----	1000	5,36	5,56

A. – amostra; BR - branco

## ANEXO II – RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ATÓMICA POR PLASMA ACOPLADO INDUZIDO DOS ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO LABORATORIAIS

---

Nos seguintes quadros encontram-se os resultados globais do ICP-AES de todas as amostras em estudo. Os valores assinalados (cor amarela) correspondem a valores excluídos por apresentarem valores de concentração inferiores aos valores detectados nos brancos efectuados (quadro A.2.6)

**Quadro A.2.1:** Resultados de ensaio de lixiviação em meio ácido, para chips de pneus usados (mg/L).

A.	Al	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Zn
1	0,0113	0,1512	n.d	0,0014	0,0037	0,1882	0,0578	0,0005	n.d	n.d	0,0033	0,5806
2	0,1024	0,5521	n.d	0,0012	0,0070	0,2825	0,0318	0,0008	n.d	n.d	0,0069	0,7541
3	n.d	0,0986	n.d	n.d	0,0029	0,2005	0,0806	n.d	n.d	n.d	n.d	0,4716
4	n.d	0,3066	n.d	0,0006	n.d	0,0192	0,0514	n.d	n.d	n.d	n.d	0,3831
5	n.d	0,0498	n.d	0,0006	n.d	0,0434	0,1616	n.d	0,0016	n.d	n.d	0,1902
6	0,0161	0,4495	n.d	0,0008	0,0034	0,1520	0,0451	0,0007	0,0010	n.d	0,0046	0,7568
7	n.d	0,0519	n.d	0,0008	0,0052	0,5072	0,2821	n.d	0,0050	n.d	n.d	0,6401
8	n.d	0,3999	n.d	0,0006	0,0026	0,0058	0,1847	n.d	0,0021	n.d	n.d	0,1725
9	n.d	0,3293	n.d	0,0009	0,0061	0,1559	0,0586	0,0005	0,0015	n.d	n.d	0,5382
10	n.d	0,3354	n.d	0,0009	0,0024	0,0239	0,0693	0,0003	n.d	n.d	n.d	0,2563

A. – amostra; n.d – não detectado

**Quadro A.2.2:** Resultados de ensaio de lixiviação em meio básico para chips de pneus usados (mg/l).

A.	Al	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Zn
1	0,0842	0,1857	n.d	0,0035	0,0139	1,1026	0,0080	0,0022	0,0051	0,0245	0,0216	0,1091
2	0,1242	0,1835	0,0048	0,0029	0,0094	1,1704	0,0099	0,0011	0,0026	0,0190	0,0101	0,1377
3	0,2224	0,2054	0,0065	0,0036	0,0176	1,3591	0,0124	0,0022	0,0037	0,0256	0,0319	0,2038
4	0,1901	0,2082	n.d	0,0012	0,0066	0,3640	0,0050	N.A	n.d	n.d	N.A	0,1198
5	0,1133	0,1610	0,0062	0,0038	0,0089	0,4721	0,0057	0,0021	0,0028	0,0210	0,0159	0,2376
6	0,2127	0,2434	n.d	0,0036	0,0127	1,9292	0,0155	0,0016	0,0018	0,0172	n.d	0,2235
7	0,1751	0,2127	0,0066	0,0036	0,0098	1,0301	0,0111	0,0022	0,0025	0,0219	0,0164	0,1226
8	0,2068	0,2053	n.d	0,0012	0,0111	0,6416	0,0076	N.A	n.d	n.d	N.A	0,1334
9	0,1932	0,1852	n.d	0,0034	0,0173	0,5096	0,0070	0,0017	0,0031	0,0207	0,0296	0,1142
10	0,1715	0,1974	0,0064	0,0038	0,0107	1,2496	0,0136	0,0023	0,0036	0,0276	0,0358	0,1464

A. – amostra; n.d – não detectado; N.A – não analisado

**Quadro A.2.3:** Resultados do ensaio de lixiviação em meio natural para chips de pneus usados (mg/l).

A.	Al	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Zn
1	0,1114	0,2244	n.d	n.d	0,0239	2,1492	0,0197	N.A	n.d	n.d	N.A	0,3875
2	0,1218	0,1912	0,0029	0,0039	0,0127	0,9136	0,0110	0,0032	0,0050	0,0330	0,0140	0,1278
3	0,1327	0,1934	0,0074	0,0044	0,0121	1,0908	0,0093	0,0034	0,0053	0,0394	n.d	0,1118
4	0,0523	0,1626	0,0070	0,0035	0,0093	0,2983	0,0029	0,0031	0,0044	0,0320	0,0097	0,0262
5	0,0591	0,2095	0,0072	0,0042	0,0122	0,4408	0,0052	0,0029	0,0062	0,0294	n.d	0,0624
6	0,3261	0,2325	0,0073	0,0046	0,0103	0,2932	0,0053	0,0033	0,0050	0,0333	n.d	0,0842
7	0,0435	0,2048	n.d	n.d	0,0038	0,7455	0,0070	N.A	n.d	n.d	N.A	0,0931
8	0,1502	0,2117	0,0076	0,0034	0,0122	0,7324	0,0088	0,0043	0,0052	0,0330	0,0094	0,1739
9	0,0430	0,1807	0,0071	0,0039	0,0086	0,0421	0,0013	0,0029	0,0042	0,0301	n.d	0,0129
10	0,0862	0,2003	0,0068	0,0038	0,0085	0,2959	0,0042	0,0032	0,0044	0,0282	n.d	0,0625

A. – amostra; n.d – não detectado; N.A – não analisado

**Quadro A.2.4:** Resultados do ensaio de lixiviação em meio ácido para brita calcária (mg/l)

A.	Al	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Zn
1	n.d	0,6892	n.d	0,0012	0,0019	0,0030	0,0008	0,0007	n.d	n.d	n.d	0,1260
2	0,0230	0,3870	n.d	0,0009	0,0083	0,0032	0,0009	0,0008	n.d	n.d	n.d	0,1344
3	0,0307	0,1016	n.d	0,0008	n.d	0,0019	0,0009	0,0006	n.d	n.d	n.d	0,0735
4	0,0247	0,4201	n.d	0,0009	n.d	0,0016	0,0009	0,0010	n.d	n.d	n.d	0,1472
5	0,0375	0,1036	n.d	0,0008	n.d	0,0028	0,0008	0,0006	n.d	n.d	n.d	0,0684
6	n.d	0,3695	n.d	0,0023	n.d	0,0030	0,0008	0,0008	n.d	n.d	n.d	0,1125
7	0,0174	0,3036	n.d	0,0008	n.d	0,0022	0,0007	0,0006	n.d	n.d	n.d	0,0578
8	0,0232	0,2815	n.d	0,0008	n.d	0,0021	0,0008	0,0007	n.d	n.d	n.d	0,0887
9	0,0254	0,3165	n.d	0,0009	n.d	0,0022	0,0009	0,0007	n.d	n.d	n.d	0,0974
10	n.d	0,3315	n.d	0,0008	0,0017	0,0021	0,0009	0,0006	n.d	n.d	n.d	0,1018

A. – amostra; n.d – não detectado

**Quadro A.2.5:** Resultados do ensaio de lixiviação em meio natural para brita calcária (mg/l)

A.	Al	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Zn
1	0,1744	0,1105	0,0017	0,0014	0,0026	0,0054	0,0004	n.d	n.d	n.d	n.d	0,0047
2	0,1823	0,0969	0,0039	0,0012	0,0034	0,0057	0,0006	0,0010	n.d	n.d	n.d	0,0071
3	0,1801	0,1070	0,0035	0,0011	0,0053	0,0046	0,0006	0,0013	n.d	n.d	n.d	0,0072
4	0,0968	0,1269	0,0021	0,0016	0,0041	0,0071	0,0006	0,0010	n.d	0,0111	n.d	0,0071
5	0,1175	0,089041	n.d	n.d	n.d	0,003047	n.d	N.A	n.d	n.d	n.d	0,003552
6	0,2516	0,1568	n.d	0,0027	0,0046	0,0097	0,0005	0,0013	0,0012	0,0165	n.d	0,0106
7	0,1107	0,1234	0,0061	0,0012	0,0026	0,0049	0,0008	n.d	n.d	n.d	n.d	0,0095
8	0,1581	0,1222	0,0058	0,0021	0,0047	0,0080	0,0007	0,0022	n.d	0,0197	n.d	0,0316
9	0,187934	0,111356	n.d	n.d	n.d	0,002395	n.d	N.A	n.d	n.d	n.d	0,012158
10	0,1442	0,1005	0,0062	0,0025	0,0040	0,0085	0,0007	0,0019	n.d	0,0168	0,0124	0,0081

A. – amostra; n.d – não detectado; N.A – não analisado

Importa realçar que, os valores assinalados no quadro A.2.6 Valores de Brancos, correspondem a valores excluídos, devido à sua discrepância em relação aos restantes valores obtidos.

**Quadro A.2.6:** Valores de Brancos (mg/l)

A.	Al	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Zn
B1	0,0253	0,0638	0,0000	0,0030	0,0043	0,0115	0,0006	0,0013	0,0025	0,0187	n.d	0,0089
B2	0,0000	0,0208	0,0000	0,0000	0,0000	0,0352	0,0000	N.A	0,0000	0,0000	n.d	0,0064
N1	0,0193	0,0713	0,0069	0,0020	0,0055	0,0073	0,0006	0,0014	0,0000	0,0208	n.d	0,0101
N2	0,0561	0,0729	0,0069	0,0043	0,0063	0,0118	0,0010	0,0037	0,0057	0,0303	n.d	0,0294
N3	0,0143	0,0993	0,0000	0,0000	0,0040	0,0027	0,0000	N.A	0,0000	0,0000	n.d	0,0694
N4	0,0000	0,0241	0,0000	0,0000	0,0000	0,0040	0,0000	N.A	0,0000	0,0000	n.d	0,0068
N5	0,0000	0,0481	0,0000	0,0000	0,0000	0,0029	0,0000	N.A	0,0000	0,0000	n.d	0,0049
A1	0,0000	0,4183	0,0000	0,0014	0,0018	0,0034	0,0008	0,0000	0,0000	0,0000	n.d	0,2952
A2	0,0000	0,1310	0,0000	0,0017	0,0045	0,0832	0,0010	0,0004	0,0000	0,0000	n.d	0,1053
A3	0,0110	0,7599	0,0000	0,0015	0,0041	0,0025	0,0011	0,0000	0,0061	0,0000	n.d	0,5198
A4	0,0146	0,0760	0,0000	0,0014	0,0016	0,0072	0,0008	0,0000	0,0000	0,0000	n.d	0,0246
A5	0,0000	0,1556	0,0000	0,0000	0,0012	0,0012	0,0000	N.A	0,0000	0,0000	n.d	0,1163
A6	0,0174	0,3147	0,0000	0,0000	0,0000	0,0044	0,0000	N.A	0,0000	0,0000	n.d	0,2158
A7	0,0000	0,2249	0,0000	0,0000	0,0000	0,0167	0,0000	N.A	0,0000	0,0000	n.d	0,1329

A. – amostra; B – meio básico; N – meio natural; A – meio ácido; n.d – não detectado; N.A – não analisado

## ANEXO III – RESULTADOS GLOBAIS DAS ÁGUAS PLUVIAIS RECOLHIDAS NO ATERRO AMARSUL – PALMELA

---

**Quadro A.3.1:** Data e hora de recolha e valores de pH e condutividade para as águas pluviais recolhidas no Aterro da Amarsul – Palmela.

Data	Hora	Ponto de Recolha	pH	condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
04-11-2010	10:30 AM	Depósito Chips	7,54	1743
04-11-2010	10:30 AM	Depósito Brita	7,79	1509
09-12-2010	10:00 AM	Depósito Chips	7,10	1666
09-12-2010	10:00 AM	Depósito Brita	7,45	1478
21-12-2010	10:30 AM	Depósito Chips	7,90	1453
21-12-2010	10:30 AM	Depósito Brita	7,52	1305
07-01-2011	10:00 AM	Depósito Chips	6,77	1330
07-01-2011	10:00 AM	Depósito Brita	7,05	1121
28-01-2011	10:00 AM	Depósito Chips	7,37	1387
28-01-2011	10:00 AM	Depósito Brita	7,00	1043

## ANEXO IV – RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ATÓMICA POR PLASMA ACOPLADO INDUZIDO DAS ÁGUAS PLUVIAIS RECOLHIDAS NO ATERRO DA AMARSUL – PALMELA

**Quadro A.4.1:** Resultados totais das análises de ICP-AES das amostras de águas pluviais recolhidas no Aterro Amarsul – Palmela.

Amostra	Al (mg/l)	As (mg/l)	Ba (mg/l)	Cd (mg/l)	Cr (mg/l)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)	Hg (mg/l)	Mn (mg/l)	Mo (mg/l)	Ni (mg/l)	Pb (mg/l)	Sb (mg/l)	Se (mg/l)	Zn (mg/l)
B1 AS							0,0062								0,0019
B2 AS							0,0092								0,0016
B3 AS							0,0095								0,0018
B4 AS							0,0185								0,0055
AsC 04/11	0,0561		0,2796				0,2162								0,0853
AsB 04/11			0,4791				1,6212		0,0356	0,0122					0,1369
AsC 09/12	0,0702		0,3876				1,0578		1,1748						0,1550
AsB 09/12	0,0980		0,4368				2,2710		1,6951						0,1695
AsC 29/12	0,0291		0,2795				0,1321		0,9136						0,1023
AsB 29/12	0,0542		0,2190			0,0269	0,6446		1,5443						0,1807
AsC 07/01	0,0183		0,2636				6,5696		1,0597						0,1373
AsB 07/01			0,2472				15,387		1,3834						0,1329
AsC 28/01			0,3605				0,0690		0,5100						0,1913
AsB 28/01	0,0860		0,4454				0,1140		0,0447						0,2504

**B AS-** Branco; **AsC-** Amostra recolhida em depósito da célula construída com chips de pneus usados; **AsB-** Amostra recolhida em depósito da célula construída com brita calcária;

**Observações:** Células em branco - elemento não detectado, inferior ao limite de detecção